PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektriciteitsleer

Leerlingboek AS-5

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Nederland 1975

*Alle rechten uitdrukkelijk voorbehouden.
Vermenigvuldiging of mededeling aan derden,
in welke vorm ook, is zonder schriftelijke
toestemming van eigenares niet geoorloofd.*

Tweede, herziene druk 1976
Vijfde druk 1979

161210.5

PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektriciteitsleer

Leerlingboek AS-5

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

OVER DEZE SCANS
Als basis voor deze scans hebben wij gebruik gemaakt van de door 'Freeservicemanuals' in 2018 gemaakte scans. Wij hebben de pagina's van deze scans echter zorgvuldig naar de originele staat gerestaureerd, onder andere door alle persoonlijke notities en de antwoorden op alle oefeningen en vragen te verwijderen.

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Nederland 1975

Alle rechten uitdrukkelijk voorbehouden. Vermenigvuldiging of mededeling aan derden, in welke vorm ook, is zonder schriftelijke toestemming van eigenares niet geoorloofd.

Tweede, herziene druk 1976
Vijfde druk 1979

161210.5

INHOUDSOPGAVE

b

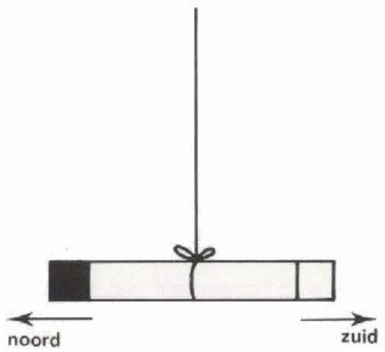
A 45 MAGNETISME

DE MAGNEET

In de volgende lessen gaan we spoelen en transformators behandelen. Het is dan nuttig iets te weten over magnetisme .

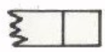
Oorspronkelijk werd een magneet alleen in de natuur aangetroffen als een stuk metaal, dat in staat bleek ijzer of staal aan te trekken. Deze in de natuur aanwezige magneten noemen we *permanente magneten*, (permanent = blijvend). Overigens is men thans ook in staat permanente magneten kunstmatig te fabriceren.

Heeft een magneet een staafvorm, dan spreekt men van een *staafmagneet.*



Hangt men zo'n magneet in het midden op aan een draad, dan neemt hij ongeveer een stand in de richting noord-zuid in. De kant die naar het noorden wijst noemt men de *noordpool* en die naar het zuiden wijst de *zuidpool* van de magneet.

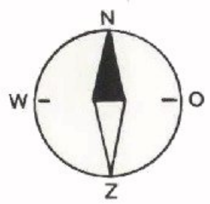
In de tekeningen geven wij de noordpool voortaan als volgt aan: 

en de zuidpool zo: 

Het gedrag van magneetpolen kan men met behulp van een paar magneten onderzoeken. Brengt men deze bij elkaar in de buurt, dan blijkt:

Gelijknamige polen stoten elkaar af en
ongelijknamige polen trekken elkaar aan.

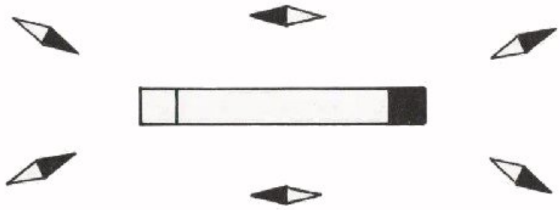
Dat een opgehangen staafmagneet zich in de noord-zuid richting opstelt, komt omdat ook de aarde zelf zich als een grote magneet gedraagt. In de buurt van de aardrijkskundige Noordpool bevindt zich een magnetische zuidpool en in de buurt van de Zuidpool zit een magnetische noordpool.
Een toepassing van het bovenstaande vindt men in het *kompas.*

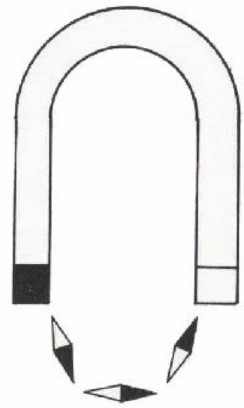


Dit bestaat uit een klein draaibaar opgesteld staafmagneetje. Met behulp van een kompas kan men de windrichtingen bepalen.

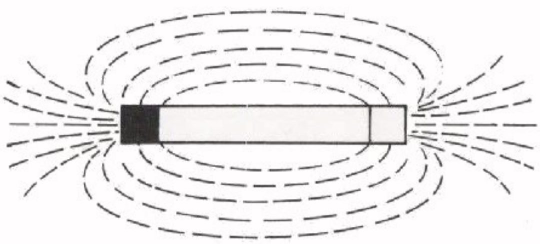
HET MAGNETISCH VELD

Houden we een klein kompasnaaldje in de buurt van een veel grotere permanente magneet, dan is de stand van het kompasnaaldje erg afhankelijk van de plaats.





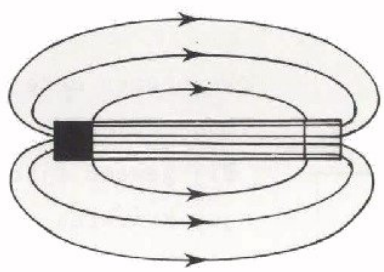
Nog mooier kan men dit laten zien met behulp van ijzervijlsel. Verderop zullen we zien dat stukjes ijzervijlsel zich in de buurt van een magneet gaan gedragen als heel kleine kompasnaaldjes. We leggen voor de proef met ijzervijlsel een permanente magneet op tafel. Op de magneet leggen we een glasplaat of een stevig stuk papier. Daarop strooien we voorzichtig wat ijzervijlsel en tikken eventueel zachtjes tegen de glasplaat of het papier. Er ontstaat dan een patroon zoals hieronder is geschetst.



Deze invloed van een magneet op een kompasnaaldje of op ijzervijlsel betekent dat er een *magnetisch veld* aanwezig is.

FLUXLIJNEN

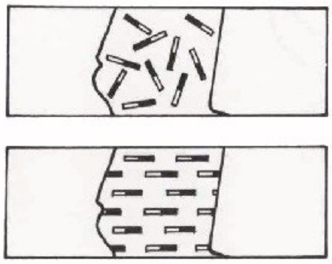
Het ijzervijlselplaatje zullen we nog eens tekenen, alleen wat vereenvoudigd. Met enkele globale lijnen geven we de richting aan waarin de ijzervijlseldeeltjes "aan elkaar gegroeid" zijn. Tevens geven we met behulp van pijlpuntjes op de lijnen aan in welke richting het N-pooltje van een kompas op die plaats zou wijzen.



Ver van een magneet verwijderd is het nauwelijks te merken dat hij ijzer aantrekt. Dit is alleen goed merkbaar in de naaste omgeving van de magneet. Men zegt, dat in de buurt van de magneet, waar een stukje ijzer merkbaar wordt aangetrokken, een *magnetisch veld* aanwezig is. Het is in het magnetische veld net alsof er iets van de N-pool naar de Z-pool gaat. Dit iets noemen we de *magnetische flux*. De in het plaatje getekende lijnen noemen we de *fluxlijnen* of ook wel krachtlijnen. Deze voorstelling van het magneetveld kunnen we alleen in een tekening duidelijk maken. Fluxlijnen zijn denkbeeldige lijnen en kunnen niet echt bij een magneet worden waargenomen. De pijlpuntjes op de fluxlijnen wijzen de richting aan waarin de noordpool van een kompasnaaldje zou wijzen.
De magnetische flux duidt men aan met de griekse hoofdletter Φ ; spreek uit "fie".

OPDELEN VAN EEN PERMANENTE MAGNEET

Als we een permanente magneet overdwars door midden breken krijgen we twee nieuwe permanente magneten. Zagen we deze magneten elk weer door, dan krijgen we vier magneten.
Als we zo doorgaan, kunnen we uiteindelijk zeer veel kleine magneetjes krijgen, die samen de oorspronkelijke magneet vormden. We kunnen aldus elke permanente magneet opgebouwd denken uit een zeer groot aantal zeer kleine magneetjes.
Ook een stuk ijzer kunnen we opgebouwd denken uit een zeer groot aantal zeer kleine magneetjes.



We noemen deze kleine magneetjes *elementair magneetjes.*
Bij gewoon ijzer liggen de elementair magneetjes kriskras door elkaar, waardoor hun magnetische invloed niet naar buiten treedt.
Brengen we zo'n stuk ijzer in een magneetveld, dan worden die elementair magneetjes gedwongen allemaal in dezelfde richting te gaan staan.
Hun gezamenlijke magnetische invloed is nu wel van buitenaf merkbaar. We zeggen dan: het ijzer wordt *gemagnetiseerd*, het ijzer is als het ware zelf een magneet geworden.

Halen we het gemagnetiseerde stuk ijzer uit het magneetveld,dan komen de elementair magneetjes weer kriskras door elkaar te liggen. We zeggen dan, dat het ijzer *gedemagnetiseerd* is. IJzer dat zich zo gedraagt heet *weekijzer.* Daarnaast bestaat ook *hard staal* dat moeilijker is te magnetiseren en te demagnetiseren; het blijft altijd enigszins magnetisch als het eenmaal gemagnetiseerd is. Door er tegen te slaan, het te laten vallen of te verwarmen wordt het gedemagnetiseerd.
Wordt een stuk weekijzer door een permanente magneet aangetrokken, dan wordt het eerst gemagnetiseerd en daarna trekken de ongelijknamige polen elkaar aan.

MAGNEETVELD ALS GEVOLG VAN EEN STROOM

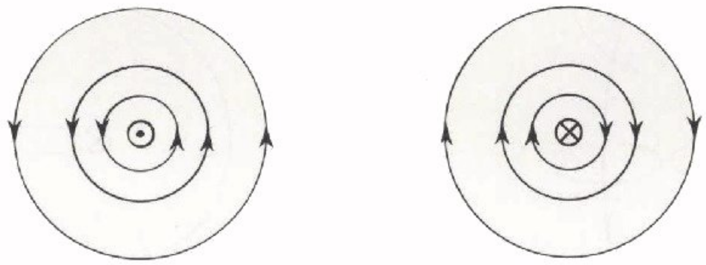
Ook een elektrische stroom blijkt magnetische invloed te kunnen uitoefenen. Laten we een gelijkstroom door een draad vloeien en houden we een kompas in de buurt, dan blijkt het naaldje daarop te reageren. De stand die het aanneemt is weer afhankelijke van de plaats ten opzichte van de draad. Om dit verschijnsel te kunnen tekenen maken we eerst een afspraak. We tekenen op papier dat, wat we zien als we een stroomdraad loodrecht doorsnijden. We laten de draad dus als het ware door het papier heen steken en zagen hem bij het papier door. De richting van de stroom door de draad geven we aan met behulp van een pijl;



Kijken we achter op de pijl, dan gaat de stroom van ons af. ⊗

Kijken we voor op de pijl, dan komt de stroom naar ons toe. ⊙

In de volgende tekeningen geven we met behulp van fluxlijnen de richting aan waarin het kompasnaaldje gaat staan, als er een stroom door de draad vloeit.

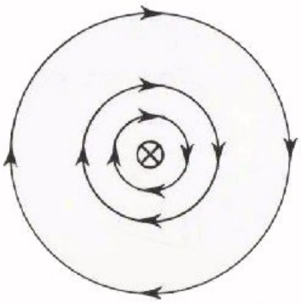


De fluxlijnen zijn nu *concentrische cirkels* (cirkels met hetzelfde middelpunt).

Uit de tekening van de fluxlijnen rondom een rechte stroomdraad kunnen we de volgende regel afleiden.

Plaatsen we in gedachten een rechtse schroef op de plaats van de stroomrichting, dan valt de draairichting van de schroef samen met de richting van de pijltjes op de fluxlijnen.

De richting van het veld dat bij een stroomvoerende draad hoort volgt uit de *rechtse schroefregel*:

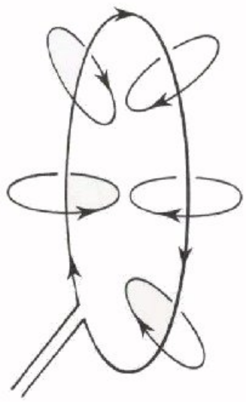


stroomvoerende
rechte draad

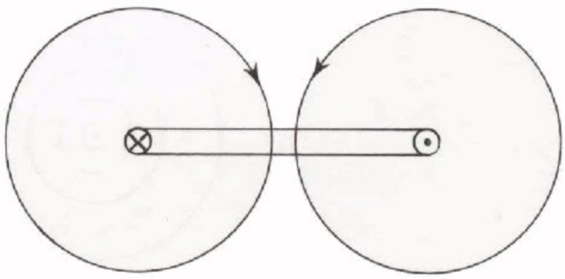
Als de *stroomrichting* samenvalt met de voortbewegingsrichting van een rechtse schroef, valt de *fluxrichting* samen met de draairichting van de rechtse schroef.

We buigen nu een rechte stroomdraad rond in de vorm van een lus. De fluxlijnen buigen mee en gaan als kringen om de stroomdraad staan.

Schematisch kunnen we dit weergeven als hieronder.



stroomvoerende lus

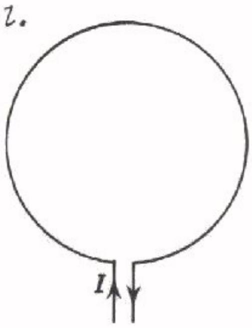


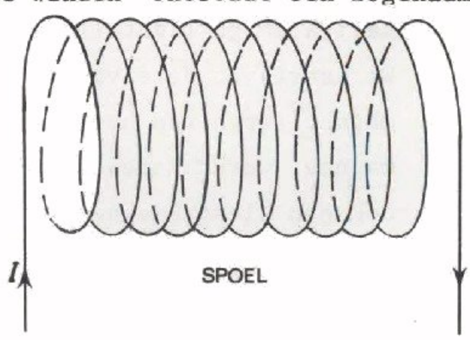
doorsnede over de lus

We zien dat de fluxlijnen binnen de lus alle dezelfde kant opwijzen. Ook buiten de lus is dit het geval.

RECHTE SPOEL

We gaan nu een aantal stroomlussen achter elkaar bekijken. Door een aantal stroomlussen achter elkaar "op te winden" ontstaat een zogenaamde *rechte spoel.*



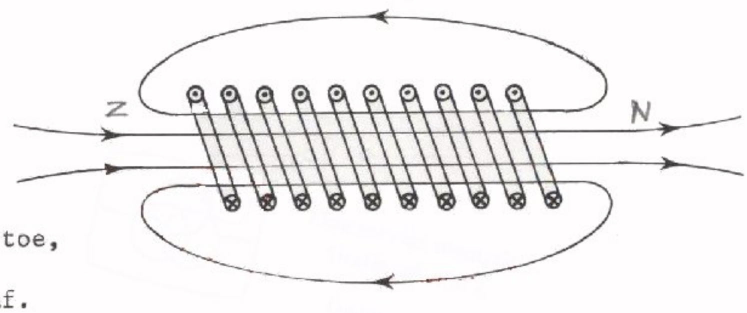


Hierboven is in voor- en zijaanzicht zo'n spoel getekend. Voor het vooraanzicht kunnen we dezelfde fluxlijnen tekenen als voor de stroomlus.
Om duidelijk te maken hoe de fluxlijnen lopen in het zijaanzicht maken we eerst een horizontale doorsnede van bovenstaande spoel.

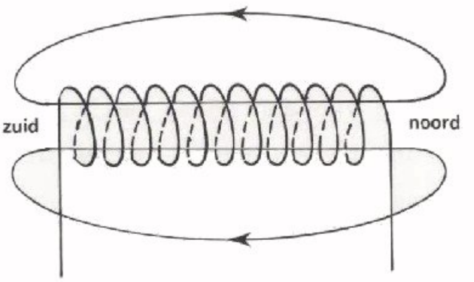
Hier staat een spoeldoorsnede waarbij de stroomdraad doorgesneden is, dus:

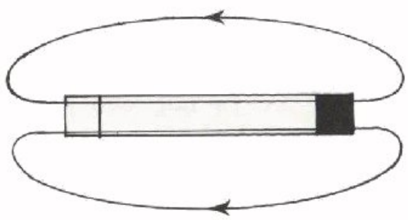
⊙ stroom naar ons toe,

⊗ stroom van ons af.



U ziet dat er grote *flux*lussen ontstaan die door alle stroomlussen omvat worden.





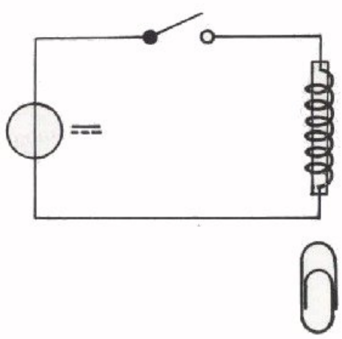
Hierboven zijn enkele fluxlijnen voor de lange rechte spoel getekend. Vergelijken we die met de fluxlijnen van de permanente staafmagneet, dan zien we dat ze net zo verlopen.
De "staafmagneet" die aldus door zo'n spoel gevormd wordt noemt men een *elektromagneet.* De N-pool van een elektromagneet zal evenals die van een staafmagneet een aantrekkende kracht uitoefenen op een in de buurt geplaatste Z-pool van een andere staafmagneet.

IJZER IN EEN SPOEL

Steken we een stuk weekijzer in de spoel, dan blijkt dat de kracht op een andere magneet in de buurt vele malen groter wordt. De kracht kan gemakkelijk enige tientallen, ja zelfs honderden keren zo groot worden.
We schrijven deze versterking van magnetische eigenschappen toe aan het magnetiseren van het ijzer. De flux van de door het weekijzer gevormde magneet werkt samen met die van de spoel.
Ook een elektromagneet met ijzerkern noemt men in zijn geheel een "elektromagneet". Elektromagneten worden veel gebruikt.
Voorbeelden:

- De elektrische bel
- Relais
- De vooral bij de bouw van ijzerconstructies gebruikte hijskranen met elektromagneten die vele tonnen ijzer kunnen optillen.

OPDRACHT: VERSTERKING DOOR IJZER

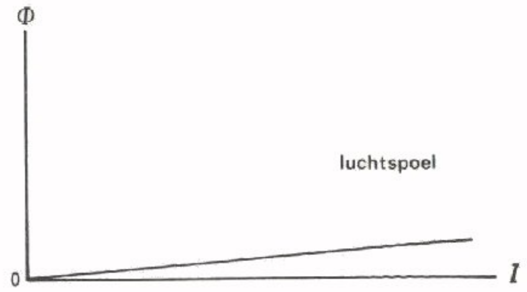


Sluit het spoeltje met de ijzeren bout erin aan op de *DC*- voedingsbron. Voer de spanning zeer voorzichtig op,totdat een paperclip door het spoeltje juist wordt aangetrokken. Verwijder daarna de ijzeren kern uit het spoeltje. U constateert,dat nu geen aantrekking van de paperclip meer optreedt.

Er is nog een belangrijke eigenschap van een spoel met ijzerkern. We hebben gezien dat we zo'n ijzerkern opgebouwd kunnen denken uit een groot aantal elementair magneetjes. Brengen we weekijzer in een zwak magnetisch veld van een spoel, dan worden lang niet alle elementair magneetjes gericht. Sturen we een grotere stroom door de spoel, dan wordt het magneetveld van de spoel sterker. Dit betekent dat er meer elementair magneetjes in het ijzer gericht worden, zodat het magnetisch veld van het ijzer ook toe gaat nemen. Als we de stroom al maar groter blijven maken, dan komt er een moment,waarop alle elementair magneetjes gericht zijn.
We zeggen dan: "Het ijzer is *verzadigd*"; of: "Het loopt in *verzadiging*".
Maken we de stroom nog groter, dan zal de flux van het ijzer niet meer toenemen, zodat de totale flux dan praktisch constant blijft.

We kunnen het verschijnsel van de verzadiging in een aantal grafieken laten zien.
We vatten nog eens samen.

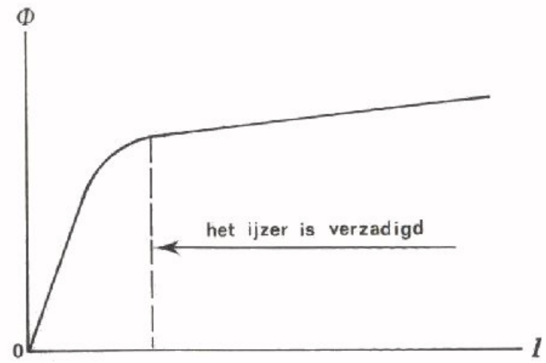
Als men de stroom door de windingen van een spoel zonder kern laat toenemen, dan zal de magnetische flux Φ evenredig met de stroom I toenemen.



Stopt men een ijzeren kern in deze spoel, dan zal Φ bij dezelfde I-waarden veel groter zijn. Het magnetisch veld van het ijzer komt er namelijk bij. Bij toeneming van I neemt Φ aanvankelijk ongeveer evenredig met I toe.



Laat men I nu nog verder toenemen, dan worden op den duur alle elementaire magneetjes in het ijzer gericht. Bij verdere toename van I zal Φ nog nauwelijks toenemen.
Het ijzer is dan *in verzadiging* gekomen.



Bij verdere toename van I zal de flux van het ijzer n.l. niet meer toenemen; alleen de veel zwakkere flux van de stroomvoerende spoelwindingen neemt nog toe.

KRACHTEN TUSSEN MAGNETISCHE VELDEN

We weten dat magneten krachten op elkaar uitoefenen. De daarbij geldende regel is: Ongelijknamige polen trekken elkaar aan en gelijknamige polen stoten elkaar af.

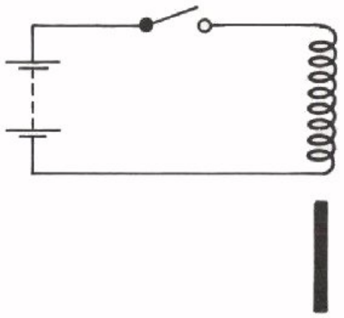
De ervaring leert dat ook magnetische velden van elektrische stromen krachten op elkaar uit kunnen oefenen. Bovendien kan het veld van een elektrische stroom kracht uitoefenen op een permanente magneet. Dit laatste geschiedt b.v. als we het magnetisch veld van een stroomvoerende draad onderzoeken met een kompas.

In geval van krachtswerking van het magnetisch veld van een elektrische stroom kan men bovenstaande regel van de "magneetpolen" vaak niet meer toepassen. Bij een stroomvoerende draad b.v. kan men dan volgende regel gebruiken:

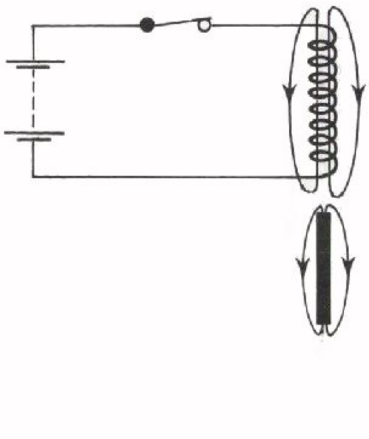
Magnetische velden proberen altijd zo goed mogelijk samen te vallen.

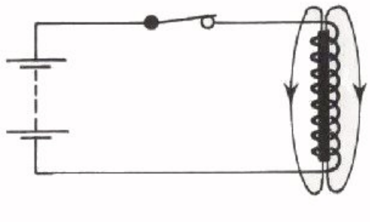
We geven hiervan twee voorbeelden.

- Voorbeeld 1.

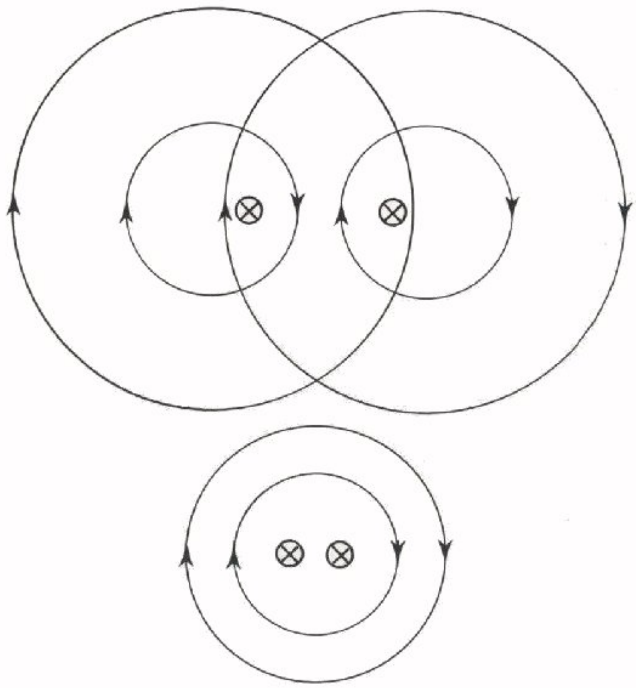


Onder een rechte spoel stellen we een ijzeren staafje op. Sturen we nu een stroom door de spoel, dan ontstaat om de spoel een magneetveld.
Dit magneetveld magnetiseert het stuk ijzer. Aanvankelijk vallen de velden van de spoel en van het ijzer nog niet samen. Volgens bovenstaande regel willen zij echter samen gaan vallen. Dit betekent dat het staafje in de spoel wordt getrokken.





● Voorbeeld 2.



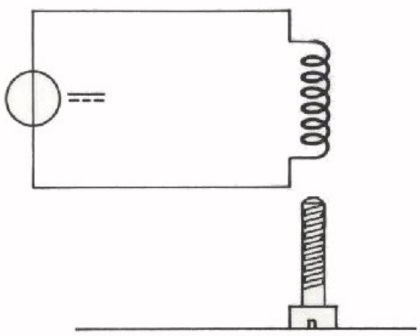
Als men twee evenwijdige stroomvoerende geleiders met gelijkgerichte stromen in de buurt van elkaar opstelt, vallen hun magnetische velden niet geheel samen. Ze zullen dit echter wel proberen te doen en dit zal pas het geval zijn als de geleiders vrijwel samenvallen.

Hieruit volgt dat de geleiders elkaar aan zullen trekken vanwege hun magnetische velden die samen willen vallen.

OPMERKING

Vooral in het laatste voorbeeld kan men goed zien, dat de regel van de "ongelijknamige en gelijknamige polen" niet te gebruiken is om de aantrekking te verklaren.

OPDRACHT: IJZER BINNEN EEN SPOELTJE TREKKEN



Sluit het hiernaast geschetste spoeltje aan op de DC-voeding. Stel de spanning in op 0 V en de maximaal te leveren stroom op 100 mA.

Zet de ijzeren bout op uw tafel en zorg ervoor dat hij net even in het spoeltje steekt.

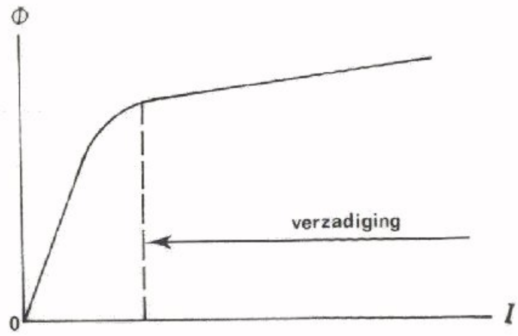
Laat daarna de spanning toenemen totdat de bout in het spoeltje wordt getrokken.

SAMENVATTING

- Een (*permanente*) *magneet* is een stuk staal of ijzerverbinding, dat de eigenschap heeft stukjes ijzer aan te trekken.
- Hangt men een staafmagneet in het midden op, dan wijst zijn ene kant (de z.g. *noordpool*) ongeveer naar het noorden en de andere kant (de z.g. *zuidpool*) ongeveer naar het zuiden.
- Een *kompas* heeft een klein draaibaar opgesteld staafmagneetje, dat dienst doet om de noord-zuid richting te bepalen.
- Gelijknamige magneetpolen stoten elkaar af en ongelijknamige trekken elkaar aan.
- Magnetisch materiaal kan men opgebouwd denken uit zeer vele,heel kleine magneetjes - z.g. *elementair magneetjes* - die in niet-gemagnetiseerde toestand kriskras door elkaar liggen.

  Bij een magneet zijn de elementair magneetjes min of meer gericht, waardoor aan de ene kant een *noordpool* en aan de andere kant een *zuidpool* ontstaat.
- De krachtsinvloed,die van een magneet uitgaat,noemt men de *magnetische flux*, aangeduid met de letter Φ; spreek uit "fie". De flux wordt in tekeningen aangegeven met *fluxlijnen*, ook wel *krachtlijnen* genoemd. Zij geven de richting aan,waarin een kompasnaaldje gaat staan. Het noordpooltje wijst dan in de pijlrichting.
- Ook een stroomvoerende draad, een lus of een spoel heeft een magnetisch veld bij zich. De magnetische flux is steeds geheel in zichzelf gesloten en om de elektrische stroom heen gelegen.
- De richting van de elektrische stroom en die van de magnetische flux horen bij elkaar als de voortbewegings- en de draairichting van een *rechtse schroef.*
- Door een spoel van een ijzeren kern te voorzien wordt het magnetisch veld van de spoel versterkt met het veel sterkere veld van het gemagnetiseerde ijzer.

- Laat men de stroom *I* door een spoel met ijzerkern toenemen, dan neemt de flux Φ aanvankelijk ongeveer evenredig toe met de stroom, omdat er al maar meer elementair magneetjes gericht worden.
  Bij grotere stromen loopt het ijzer *in verzadiging*. Alle elementair magneetjes zijn dan gericht en Φ neemt nauwelijks meer toe.



- Voor *magneetpolen* geldt de regel, dat ongelijknamige polen elkaar aantrekken en gelijknamige elkaar afstoten.
  Voor *magnetische velden* geldt, dat zij altijd zullen proberen samen te vallen.

A45.14

NAAM: ______________________ KLAS: ________

OEFENINGEN

1. De pijlpunten die in de magnetische fluxlijnen worden getekend, geven aan:

   de richting van de kracht, die op een kompasnaaldje zal worden uitgeoefend. O

   de richting van de kracht, die op een kleine positieve lading zal worden uitgeoefend. O

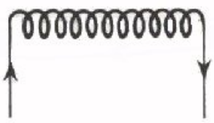
   de richting waarin het noordpooltje van het kompasnaaldje wordt gericht. O

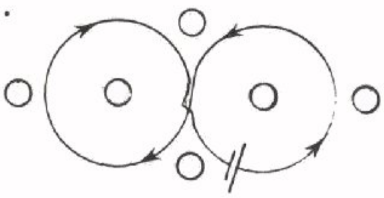
   de richting van de kracht, die op een elektrisch stroompje dat zo loopt zal worden uitgeoefend. O

2. Teken fluxlijnen met pijltjes bij volgende stromen:

   a. ⊗

   b. ⊙

   c. 

3. 

Er loopt elektrische stroom door de 8-vormige draad die hiernaast is getekend. Verder zijn op zes plaatsen kleine cirkeltjes getekend. Geef de magnetische veldrichting op deze plaatsen aan door in de cirkeltjes een x of een · te zetten.

Als er geen veld is moet u het cirkeltje open laten.

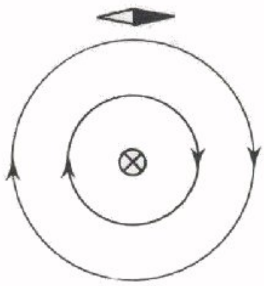
A45.16

A 46

D E   T R A N S F O R M A T O R

MAGNETISCHE FLUX

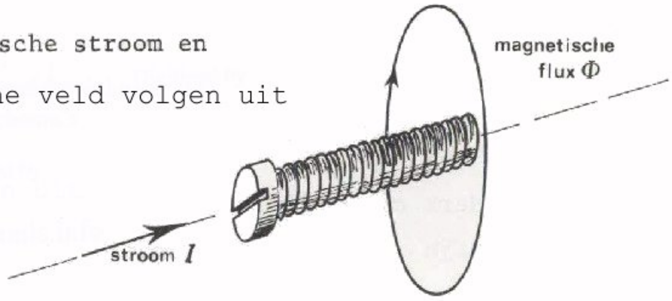
We herhalen nog enige punten uit de vorige les.



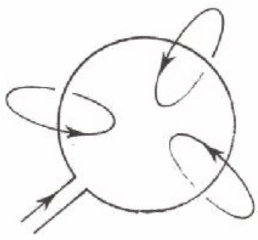
- Een geleider,waar stroom door gaat,heeft altijd een magnetisch veld om zich heen. Dit veld vormt als het ware een "ring" om de geleider. We zeggen vaak, dat het veld met de geleider is *gekoppeld.*

- Het magnetisch veld oefent een krachtsinvloed uit, die men kan constateren door een kompasnaaldje in het veld te brengen. De krachtsinvloed noemen we de *magnetische flux* Φ. In tekeningen geven we deze aan door middel van fluxlijnen. De pijlpuntjes op deze fluxlijnen geven de richting aan, waarin de noordpool van een kompasnaaldje zal wijzen.

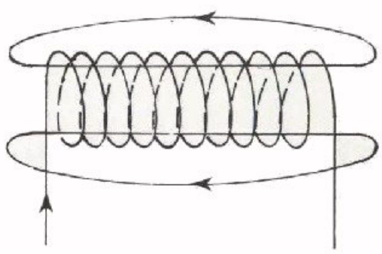
- De richtingen van de elektrische stroom en het bijbehorend magnetische veld volgen uit de rechtse schroefregel.



- Ook met een stroomvoerende lus of *winding* is een magnetisch veld gekoppeld.



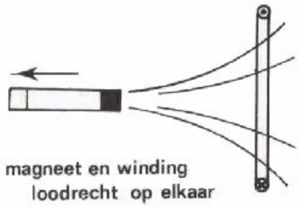
- Een aantal windingen vormen samen een *spoel*, waarmee ook weer een magnetisch veld is gekoppeld.



- Het magnetisch veld van een spoel kan men aanzienlijk versterken door er een *ijzeren kern* in aan te brengen.
  Maakt men de stroom door de spoel groter, dan loopt dit ijzer op den duur *in verzadiging.*

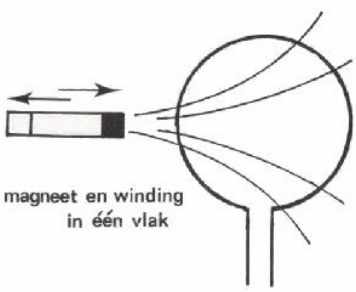
HET INDUCTIEVERSCHIJNSEL

In het voorafgaande hebben we gezien, dat een stroomvoerende geleider een magnetisch veld veroorzaakt. Gaat er door een geleider een wisselstroom, dan is er met die geleider ook een veranderend magneetveld gekoppeld.
Ook het omgekeerde is waar.
Bewegen we namelijk een staafmagneet op en neer in een winding, dan gaat er in die winding een wisselende stroom lopen.



Wat precieser gezegd:
Als een winding gekoppeld wordt met een wisselend magnetisch veld, dan wordt in de winding een wisselspanning opgewekt. Deze spanning veroorzaakt op zijn beurt weer een wisselstroom in de winding. De opgewekte spanning heet *inductiespanning* U_{ind}.
Hoe sneller men het magnetisch veld verandert, des te groter is de inductiespanning, die in de winding wordt veroorzaakt.

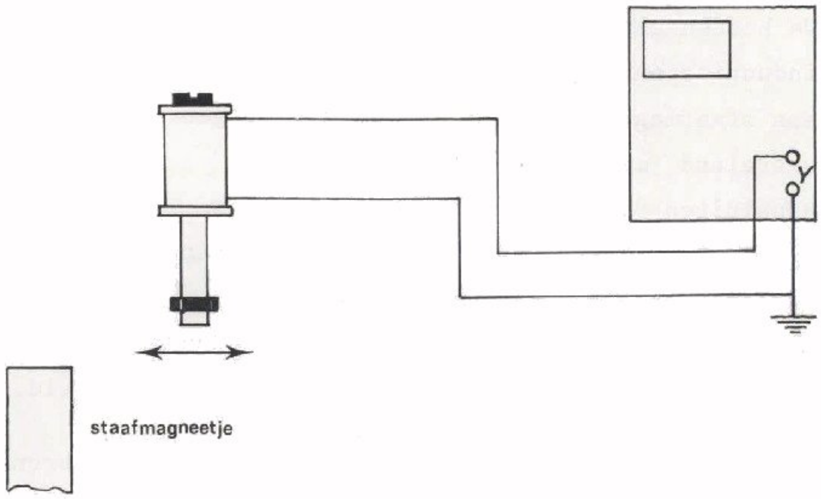
Merk op, dat de winding *gekoppeld* moet zijn met de veranderende magnetische flux.
In nevenstaand voorbeeld liggen magneet en winding in één vlak.
De magnetische flux is nu niet met de winding gekoppeld.
Bij heen en weer bewegen van de magneet treedt geen inductiespanning op.



Een spoel is een serieschakeling van een aantal windingen. Koppelt men een spoel met een wisselend magnetisch veld, dan wordt er in elke winding een inductiespanning U_{ind} opgewekt. Voor de gehele spoel met n windingen staan de opgewekte inductiespanningen in serie, zodat de totale spanning nu n x zo groot wordt.

In de volgende opdracht gaan we het opwekken van inductiespanningen aantonen.

OPDRACHT: EEN SPOEL IN EEN VERANDEREND MAGNETISCH VELD



In deze opdracht gaan we het inductieverschijnsel bekijken. We gebruiken daarbij een spoeltje met een ijzeren kern om het magnetisch veld te versterken.

- Sluit het spoeltje aan op de Y-ingang aan de oscilloscoop.
  Stel de oscilloscoop in op:

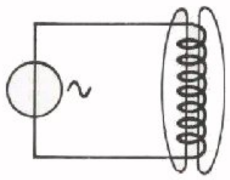
TIME/div	:	20 msec
Y-AMPL	:	10 mV/div
TRIGG	:	INT
X-DEFL	:	INT
schakelaar	:	DC

- Beweeg een staafmagneetje een aantal malen *snel* heen en weer vlak langs het ijzeren kerntje van het spoeltje.

  U ziet op het scherm de stip omhoog en omlaag bewegen door de kleine inductiespanningen.

HET PRINCIPE VAN DE TRANSFORMATOR

We hebben gezien,dat een veranderend magnetisch veld in een winding een inductiespanning veroorzaakt. Het veranderend magneetveld maakten we door een staafmagneetje heen en weer te bewegen. Een andere manier om aan een wisselend magneetveld te komen is het aansluiten van een wisselspanning op een spoel. Een sinusvormige wisselspanning aangesloten op een spoel veroorzaakt in die spoel een sinusvormige wisselstroom en daarmee is zijn sinusvormig wisselende magneetveld gekoppeld.

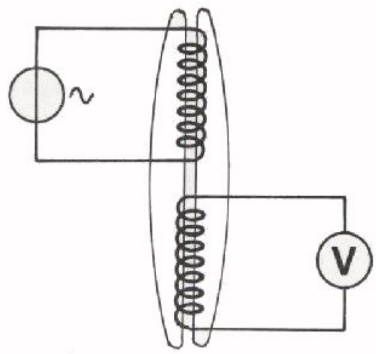


Plaatsen we nu een tweede spoel in de buurt, dan brengt het sinusvormige magneetveld in die tweede spoel een inductiespanning te weeg.

Nogmaals in het kort:

Wisselstroom geeft wisselend magneetveld.

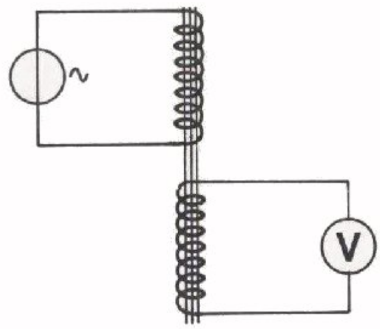
Wisselend magneetveld geeft wisselende inductiespanning.

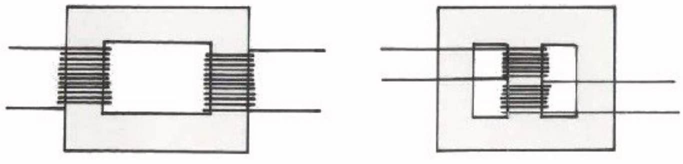


Op bovenstaande wijze hebben we een veelgebruikte component gemaakt: de *transformator*, afgekort *trafo*.

Door in de spoelen ijzer aan te brengen kan men de werking nog aanzienlijk verbeteren.

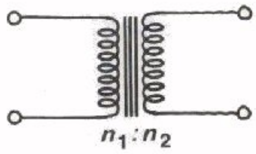
Transformators komen in allerlei uitvoeringsvormen voor, b.v.:





De eerste spoel duidt men aan als *primaire wikkeling* en de tweede spoel als *secundaire wikkeling*.

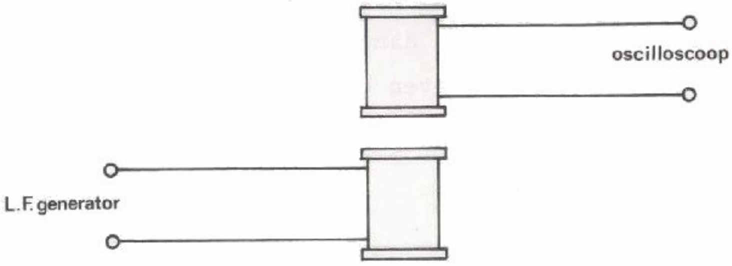
Het schemateken voor een transformator is:



In dit symbool vindt u de beide spoelen terug. Met de verticale streepjes geeft men het ijzer aan.

n_1 en n_2 betekenen het aantal windingen van de primaire en secundaire wikkeling.

OPDRACHT: :HET PRINCIPE VAN DE TRANSFORMATOR:



- Sluit een van de twee gegeven spoeltjes aan op de LF-generator. Voer een spanning toe van ongeveer 10 V bij een frequentie van 5 kHz.

- Sluit het andere spoeltje aan op de Y-ingang van de oscilloscoop. Stel de oscilloscoop in op:

TRIGG	: INT
X-DEFL	: INT
TIME/div	: 0,1 ms
Y-AMPL	: 1 V/div
schakelaar	: AC

- Plaats de spoeltjes vlak bij elkaar in elkaars verlengde. Op het scherm van de oscilloscoop ziet u nu de inductiespanning.

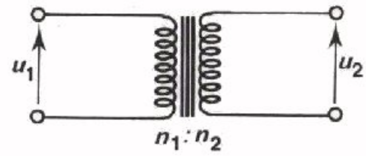
- Breng nu een gemeenschappelijke ijzeren kern in beide spoeltjes. De inductiespanning wordt nu groter. De werking van deze kleine transformator wordt door ijzer verbeterd.

SPANNINGSTRANSFORMATIE

De in een spoel geïnduceerde spanning is in elke winding even groot, omdat elke winding met eenzelfde magnetisch wisselveld is gekoppeld. Wikkelt men een spoel van b.v. 100 windingen en koppelt men die met een wisselend magneetveld, dan is u_{ind} 100 maal zo groot als die van één winding. Naarmate het aantal windingen van de secundaire wikkeling van een transformator groter is, is dus de spanning over deze secundaire spoel groter.

Dat de spanning per winding even groot is geldt niet alleen voor de secundaire,maar ook voor de primaire wikkeling van een trafo.
Als de primaire en secundaire windingen van een trafo gekoppeld zijn met een en hetzelfde veld, dan is de spanning per winding in alle primaire en secundaire windingen even groot. Hieruit volgt dat de secundaire en de primaire spanningen zich verhouden als het aantal secundaire en primaire windingen.
In formule:

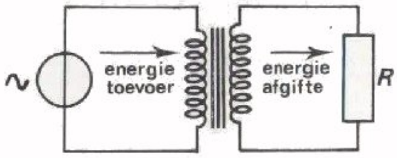
$$u_2 : u_1 = n_2 : n_1$$



Door een transformator secundair meer windingen te geven dan primair, kan men uit een gegeven wisselspanning een andere, grotere wisselspanning verkrijgen. Omgekeerd zullen mindere secundaire windingen een kleinere wisselspanning veroorzaken.

DE VERLIEZEN

Sluit men aan de primaire kant van een transformator een wisselspanning aan, dan loopt er primair een wisselstroom. Deze induceert secundair een inductiespanning. Sluiten we op de secundaire kant een weerstand aan, dan veroorzaakt de secundaire spanning een stroom door deze weerstand.
Men voert dan elektrische energie toe aan de primaire zijde van de transformator en deze energie wordt doorgegeven naar de secundaire zijde.



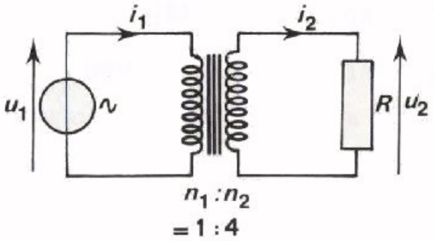
Bij een theoretisch *ideale trafo* neemt de trafo zelf geen energie op. De afgegeven energie is precies even groot als de toegevoerde. Hoewel men vaak met een ideale trafo rekent,bestaat deze in werkelijkheid niet.
Een *praktische trafo* neemt zelf wel enige energie op, zodat de afgegeven energie altijd kleiner is dan de toegevoerde. Binnen in de trafo treden *verliezen* op.

De transformatorverliezen bestaan uit:

koperverliezen en *ijzerverliezen*.

De koperverliezen ontstaan doordat de transformatorwikkelingen van koperdraad enige weerstand hebben. Er gaat energie verloren door warmte-ontwikkeling in deze windingen.
De ijzerverliezen treden op tengevolge van warmte-ontwikkeling in ijzer van de kern. Dit komt, omdat het moeite kost om de ijzeren kern telkens van de ene richting in de andere te magnetiseren. De hierdoor optredende verliezen noemt men *hysteresisverliezen*.
Daarnaast induceert de wisselende magnetische flux ook inductiestroompjes (wervelstroompjes) in het ijzer van de kern. Deze betekenen ook verliezen, de zogenaamde *wervelstroomverliezen*.
Door keuze van een geschikt soort ijzer en door listige constructies van de transformatorkern slaagt men er in deze verliezen te beperken, maar zij zijn altijd aanwezig.

STROOMTRANSFORMATIE



ideale transformator

We veronderstellen, dat we een *ideale* transformator - dus zonder verliezen hebben met een wikkelverhouding:

$$n_1 : n_2 = 1 : 4.$$

Stel verder, dat we bij belasting met een weerstand aan deze trafo toevoeren: $U_{1\ eff} = 100$ V en $I_{1\ eff} = 8$ A.

De secundaire spanning $U_{2\ eff}$ volgt nu uit:

$$u_2 : u_1 = 4 : 1 \text{ of } \frac{u_2}{u_1} = \frac{4}{1} = 4,$$

$$\text{dus: } U_{2\ eff} = 4.100 = 400 \text{ V}$$

Hoe groot is nu de secundaire stroom i_2?

Omdat de trafo ideaal is, moet het afgegeven vermogen even groot zijn als het toegevoerde vermogen.

Het primaire vermogen: $P_{prim} = U_{1\ eff} . I_{1\ eff}$ moet dus gelijk zijn aan het secundaire vermogen: $P_{sec} = U_{2\ eff} . I_{2\ eff}$

$$P_{prim} = P_{sec}$$

$$U_{1\ eff} . I_{1\ eff} = U_{2\ eff} . I_{2\ eff}$$

$$100.8 = 400 . I_{2\ eff}$$

$$\text{dus: } I_{2\ eff} = \frac{100.8}{400} = 2 \text{ A}$$

We vinden hier dat, terwijl de spanningsverhouding gelijk is aan:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{1}$$

de stroomverhouding gelijk is aan:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{2}{8} = \frac{1}{4}$$

Uit dit voorbeeld blijkt, dat de stroomverhouding bij een ideale transformator het omgekeerde is van de spanningsverhouding:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

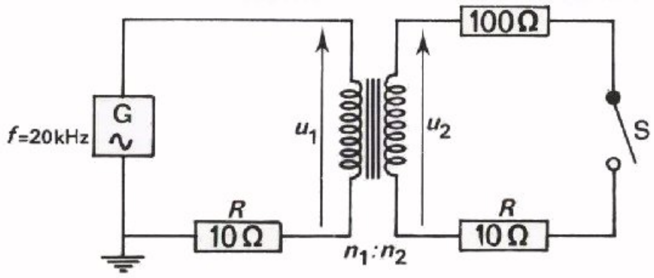
Bij een *praktische* transformator is de stroomverhouding niet precies het omgekeerde van de spanningsverhouding. Er treden verliezen in de trafo op. Het blijft echter waar, dat:

- Als men de *spanning omhoog* transformeert, men de *stroom omlaag* transformeert.
- Als men de *spanning omlaag* transformeert, men de *stroom omhoog* transformeert.

In een volgende opdracht gaan we dit onderzoeken.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE SPANNINGS- EN STROOMVERHOUDING BIJ EEN TRAFO

- Bouw volgende schakeling met de gegeven trafo. Primaire aansluitingen: rood.



- Voer de volgende metingen alle uit met een oscilloscoop. Meet daarbij de spanningen u_1 en u_2 *direct*.

  Meet de stromen in de primaire en secundaire wikkeling *indirect* door de spanningen over de serie weerstanden van 10 Ω zichtbaar te maken.
  Zorg ervoor de oscilloscoop te aarden.

- Meting 1

  Meet $\frac{U_{2_t}}{U_{1_t}}$ met S open bij:

  $U_{1_t} = 0{,}2$ V $\frac{U_{2_t}}{U_{1_t}} =$ ☐

  $U_{1_t} = 0{,}4$ V $\frac{U_{2_t}}{U_{1_t}} =$ ☐

- Meting 2

  Meet $\frac{U_{2_t}}{U_{1_t}}$ en $\frac{I_{1_t}}{I_{2_t}}$ met S gesloten en $U_{1_t} = 100$ mV:

  $\frac{U_{2_t}}{U_{1_t}} =$ ☐ $\frac{I_{1_t}}{I_{2_t}} =$ ☐

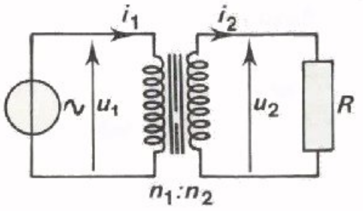
CONCLUSIES

U heeft nu zelf ervaren:

De spanningstransformatie $\frac{u_2}{u_1}$ hangt niet af van de grootte van de toegevoerde spanning (meting 1).

Als men de spanning *omhoog* transformeert, transformeert men tegelijkertijd de stroom *omlaag* (meting 2).

WEERSTANDSTRANSFORMATIE



Als we een ideale transformator met een weerstand belasten, is de secundaire stroom i_2 in fase met de secundaire spanning u_2. Men kan aantonen, dat ook de primaire stroom i_1 en spanning u_1 dan met elkaar in fase zijn.

Bij een *transformator die met een weerstand is belast* voert de spanningsbron een wisselspanning en een wisselstroom toe die met elkaar in fase zijn. Met andere woorden, de spanningsbron "ziet een ingangsweerstand".

$$R_{ing} = \frac{u_1}{i_1}$$

Hoe groot is nu deze ingangsweerstand? Met de ons bekende spannings- en stroomverhouding is deze als volgt te berekenen:

$$\left.\begin{array}{l} u_1 = \frac{n_1}{n_2} u_2 \\ \\ i_1 = \frac{n_2}{n_1} i_2 \end{array}\right\} R_{ing} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{\frac{n_1}{n_2} u_2}{\frac{n_2}{n_1} i_2} = \frac{\frac{n_1}{n_2}}{\frac{n_2}{n_1}} \left(\frac{u_2}{i_2}\right) =$$

$$\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_1}{n_2} (R) = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . R.$$

of $\boxed{R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . R}$

Getallenvoorbeeld:

Stel $n_1 : n_2 = 1 : 2$; $U_2 = 40$ V; $R = 1$ kΩ.

Dan is: $I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{40}{1000}$ A $= 40$ mA.

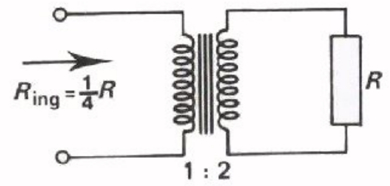
Verder geldt: $U_1 = \frac{n_1}{n_2} . U_2 = \frac{1}{2} . 40 = 20$ V en $I_1 = \frac{n_2}{n_1} . I_2 = 2.40 = 80$ mA,

zodat: $R_{ing} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{20}{\frac{80}{1000}} = 250\ \Omega = \frac{1}{4}$ kΩ.

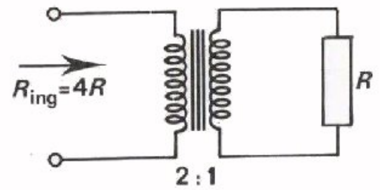
Dit klopt met:

$$R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R = \left(\frac{1}{2}\right)^2 1 = \frac{1}{4} \text{ k}\Omega$$

Uit het voorgaande volgt dat men een transformator kan gebruiken om een gegeven weerstand als het ware om te transformeren in een andere weerstand.



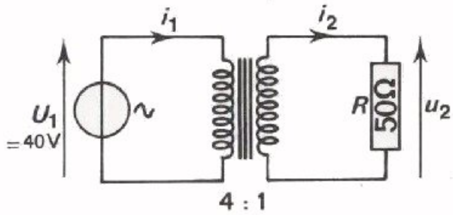
Wordt de spanning omhoog getransformeerd, dan ziet men primair een kleinere weerstand dan R.



Wordt de spanning omlaag getransformeerd, dan ziet men primair een grotere weerstand dan R.

Steeds geldt dus: aan de kant van de kleinste spanning ziet met de kleinste weerstand.

OEFENING



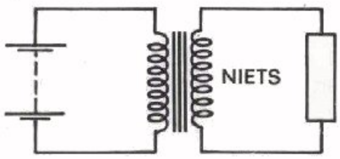
Bereken R_{ing}:

R_{ing} = [Ω]

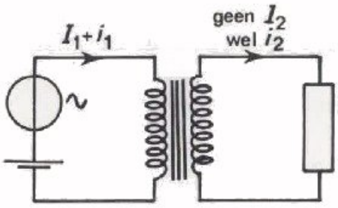
Bereken $I_{1(eff)}$:

$I_{1(eff)}$ = [mA]

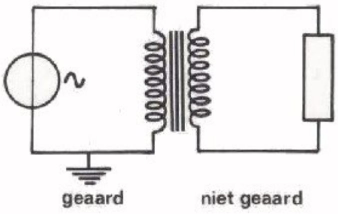
SAMENVATTING VAN DE EIGENSCHAPPEN VAN EEN TRAFO



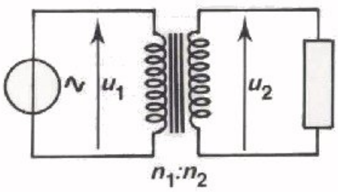
- Een transformator werkt *niet* op gelijkspanning. Voor de werking van een transformator is een veranderende magnetische flux noodzakelijk.



- De primaire en de secundaire stroomkringen zijn geheel van elkaar gescheiden. Zo zal bijvoorbeeld een in de primaire stroomkring aanwezige gelijkstroom in de secundaire kring niets veroorzaken.

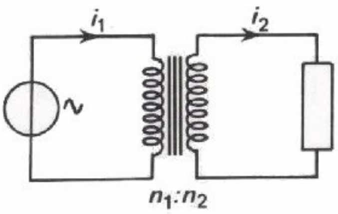


- Verder zal aarding van de ene stroomkring niet automatisch ook aarding van de andere tot gevolg hebben.



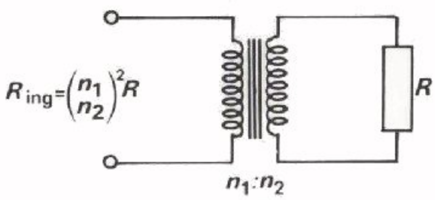
- Een transformator kan een wisselspanning omhoog (als $n_2 > n_1$) of omlaag (als $n_2 < n_1$) transformeren:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}$$



- Een transformator kan een wisselstroom omlaag (als $n_2 > n_1$) of omhoog (als $n_2 < n_1$) transformeren:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$



- Een transformator kan een weerstand omhoog (als $n_2 > n_1$) of omlaag (als $n_2 < n_1$) transformeren:

$$\frac{R}{R_{ing}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

SAMENVATTING

- Als een winding is gekoppeld met een *constante* magnetische flux, wordt er *geen* inductiespanning in opgewekt. Daarom is een transformator niet voor het transformeren van *gelijk*spanning te gebruiken.

- Als een winding is gekoppeld met een *veranderende* magnetische flux, wordt hierdoor een inductiespanning in de winding opgewekt. Hoe sneller de flux verandert, des te groter is de inductiespanning.

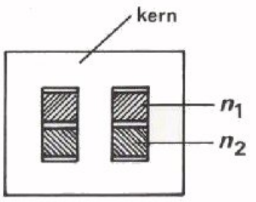
- Koppelt men een veranderende flux met een spoel met n windingen, dan is de totale inductiespanning n x zo groot als die in één winding.

- Bij een *praktische transformator* treden verliezen op:

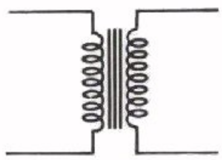
  Koperverliezen, die zijn te wijten aan de weerstand van de koperen wikkelingen.

  IJzerverliezen, die zijn te wijten aan:
  - de moeite die het kost om het ijzer telkens om te magnetiseren, (hysteresisverliezen).
  - het optreden van inductiestromen in het ijzer van de kern, (wervelstroomverliezen).

  Een transformator bestaat uit een ijzerkern, die is voorzien van twee gescheiden wikkelingen, de primaire- en de secundaire wikkeling.



doorsnede van een uitvoeringsvorm



$n_1 : n_2$
schema-symbool

- Voor een *ideale transformator*, dat is een transformator zonder verliezen, geldt:

  - De spanningen verhouden zich als de wikkelverhouding, onverschillig of men de transformator weinig of sterk belast.

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

  - De stromen verhouden zich bij belasting van de transformator omgekeerd als de wikkelverhouding.

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

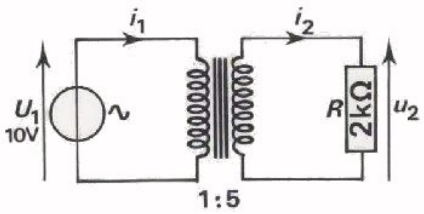
- Bij een ideale transformator, die met een *weerstand R belast* is, zijn primaire stroom en spanning in fase. Aan de ingang "ziet men een ingangsweerstand":

$$R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 . R$$

NAAM: ______________________ KLAS: ________

OEFENINGEN

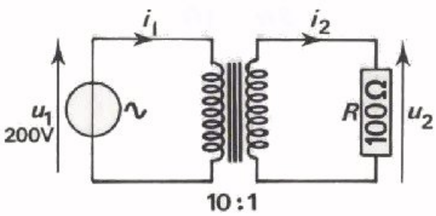
1.



De transformator moet men ideaal veronderstellen.

- Bereken de spanning $U_{2(eff)}$: $U_{2(eff)}$ =
- Bereken de stroom $I_{2(eff)}$: $I_{2(eff)}$ =
- Bereken de stroom $I_{1(eff)}$: $I_{1(eff)}$ =
- Bereken het geleverde vermogen P met behulp van $U_{2(eff)}$ en $I_{2(eff)}$: P =
- Bereken P ook met behulp van $U_{1(eff)}$ en $I_{1(eff)}$: P =

2.



De transformator moet men weer ideaal veronderstellen.

- Op de spanningsbron is als het ware een weerstand R_{ing} aangesloten. Bereken deze R_{ing}.

  R_{ing} =

- Bereken de primair toegevoerde stroom $I_{1(eff)}$:

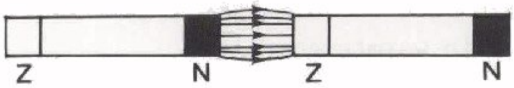
  $I_{1(eff)}$ =

A46.16

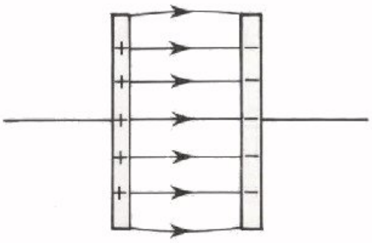
A 47 DE ZELFINDUCTIE VAN EEN SPOEL

HET MAGNETISCHE VELD EN HET ELEKTRISCHE VELD

We gaan in deze les de spoel nader bekijken. We zullen deze telkens vergelijken met de condensator. Omdat bij de spoel het magnetisch veld telkens ter sprake zal komen, zullen we om de vergelijking zo goed mogelijk te maken,ook iets vertellen over het elektrisch veld van een geladen condensator.



Tussen een magnetische noord- en zuidpool is een *magnetisch veld* aanwezig. In tekeningen stellen we dit voor door *magnetische fluxlijnen.*

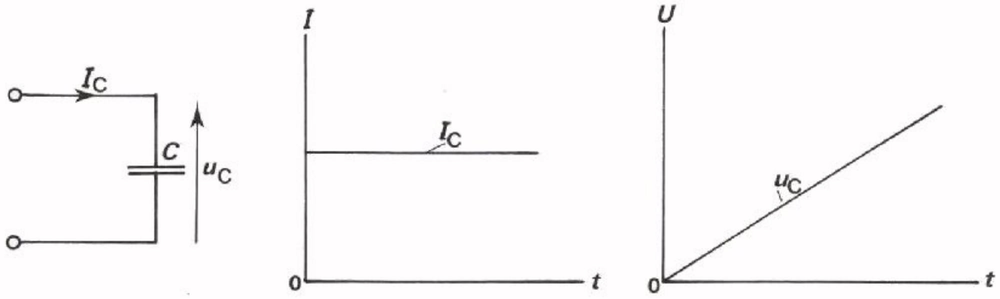


Evenzo is er tussen de + en de - plaat van een geladen condensator een *elektrisch veld* aanwezig. In tekeningen stellen we dit voor door *elektrische fluxlijnen.*

Bij het magnetisch veld tekenen we pijltjes op de fluxlijnen,die van de noord- naar de zuidpool wijzen. In het elektrisch veld tekenen we pijltjes op de fluxlijnen,die van de + naar de - lading wijzen. De pijltjes op de elektrische fluxlijnen geven de richting aan,waarin een kracht wordt uitgeoefend op een positieve lading.

HET LADEN VAN EEN CONDENSATOR

We weten, dat bij toevoer van een constante gelijk*stroom* I_C aan een condensator de *spanning* U_C lineair toeneemt. Over de condensator kan pas een bepaalde spanning ontstaan, nadat er enige tijd een laadstroom heeft gelopen.



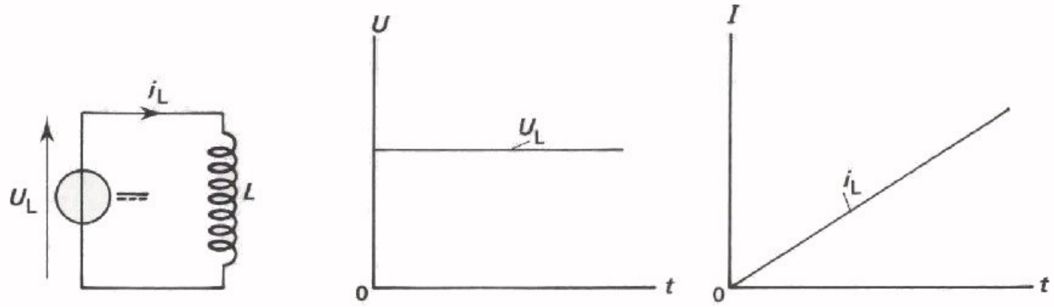
Tijdens het laden van een condensator wordt er gedurende enige tijd zowel stroom als spanning toegevoerd. Dit betekent, dat er gedurende die tijd *elektrische energie* is toegevoerd. Waar is die energie gebleven? Die elektrische energie is in de condensator opgeslagen in de vorm van het *elektrisch veld* tussen zijn platen.
Dat er inderdaad energie zit in een geladen condensator kan men gemakkelijk aantonen. Sluit men een geladen condensator namelijk aan op een weerstand, dan wordt die weerstand enige tijd verwarmd. De veldenergie van de condensator wordt dan omgezet in warmte-energie.

Voor het laden van een condensator is tijd nodig. Het duurt enige tijd om bij een constante stroom een bepaalde spanning over de condensatorplaten te krijgen. Dit komt, omdat er tijd nodig is om het elektrisch veld tussen te platen op te bouwen.

HET ONTSTAAN VAN EEN STROOM IN EEN SPOEL

Het ontstaan van een stroom in een spoel is te vergelijken met het ontstaan van een spanning over een condensator.

Voeren we aan een ideale spoel - deze heeft in het geheel geen weerstand - een constante spanning U_L toe, dan neemt de *stroom* door de spoel I_L lineair toe. Een bepaalde stroom door de spoel kan pas ontstaan, nadat er enige tijd een spanning op de spoel is aangesloten.



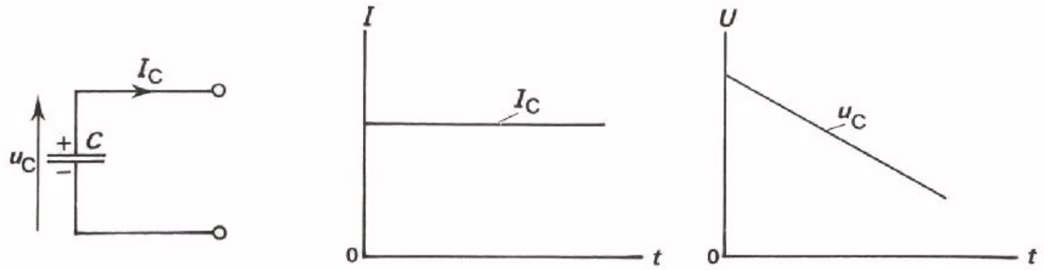
Ook hier merken we weer op, dat er gedurende enige tijd zowel spanning als stroom wordt toegevoerd. Dit betekent, dat er gedurende die tijd *elektrische energie* is toegevoerd. Waar is die energie gebleven? Die energie is in de spoel opgeslagen in de vorm van zijn *magnetische veld.*

Samenvattend kan men zeggen:

Bij het toevoeren van spanning aan een ideale spoel duurt het enige tijd om een bepaalde stroom door de spoel te laten lopen. Het duurt namelijk enige tijd om het magnetische veld van de spoel op te bouwen.

HET ONTLADEN VAN EEN CONDENSATOR DOOR MIDDEL VAN EEN GELIJKSTROOM

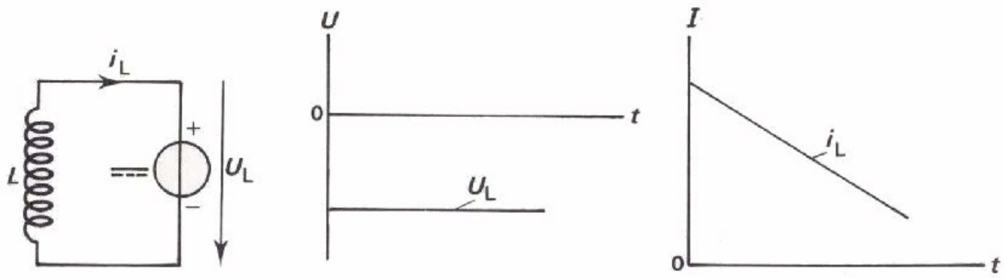
We hebben indertijd gezien,dat een condensator door een zuivere gelijkstroom lineair wordt ontladen.



Een geladen condensator heeft een hoeveelheid energie in zijn elektrische veld zitten. Tijdens het ontladen vermindert de elektrische energie van het veld van de condensator. Deze energie wordt tijdens het ontladen naar buiten geleverd. De condensator zelf is dan een energie-bron.

HET AFNEMEN VAN DE STROOM IN EEN SPOEL DOOR MIDDEL VAN EEN GELIJKSPANNING

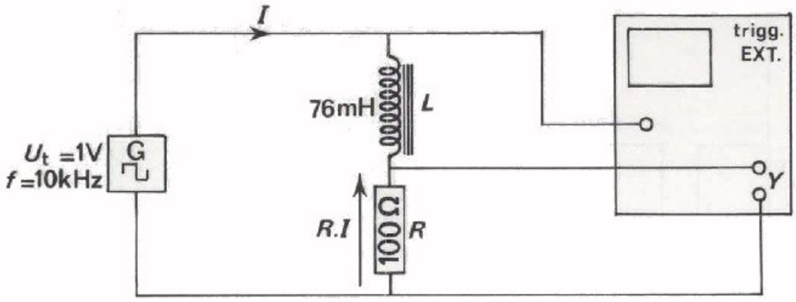
Als we een tegengestelde zuivere gelijkspanning aansluiten over een spoel, zal de in de spoel aanwezige stroom lineair afnemen.



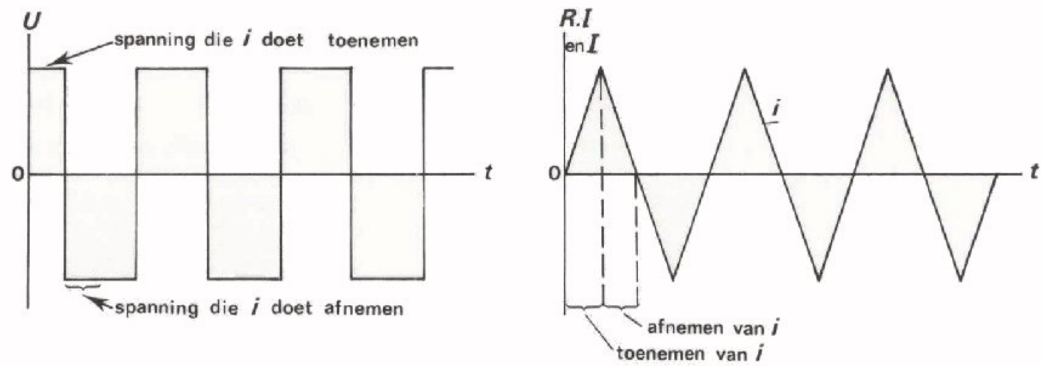
De stroomvoerende spoel heeft een hoeveelheid energie in zijn magnetisch veld zitten. Tijdens het afnemen van de stroom door de spoel vermindert de magnetische energie van het veld van de spoel. Tijdens het afnemen van de stroom wordt deze energie naar buiten geleverd. De spoel zelf is dan een energie-bron.

OPDRACHT: HET LATEN TOE- EN AFNEMEN VAN DE STROOM DOOR EEN SPOEL MET BEHULP VAN GELIJKSPANNING

Als we een blokspanning op een spoel aansluiten, sluiten we als het ware een zuivere gelijkspanning aan die telkens ompoolt. Volgens het voorgaande zal deze gelijkspanning elke halve periode van de blokspanning de spoelstroom lineair doen veranderen. Er zal dus een "driehoekstroom" door de spoel moeten gaan lopen. We gaan dit ervaren in de volgende opdracht.



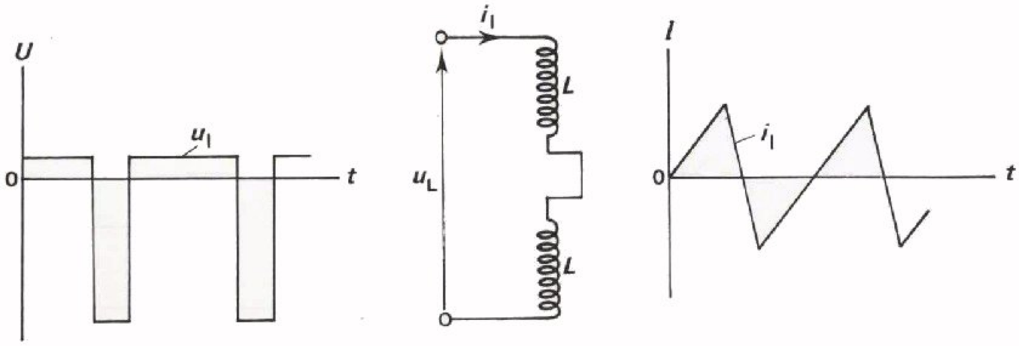
- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel.
- Zet de ingangsschakelaar op de oscilloscoop in de stand "AC" en de *X*-deflectie in de stand "INT". Trigger extern met U_t = 1 V.
- Maak ongeveer 5 perioden zichtbaar van de driehoekspanning,die over de *R* ontstaat. De spanning *R.i* verloopt net zo als de stroom *i* door de spoel.



- U ziet nu zelf dat een zuivere *gelijk*spanning op een spoel een *lineaire* verandering van de spoelstroom tot gevolg heeft.

PRINCIPE VAN DE ZAAGTANDSTROOM-GENERATOR

Een zuivere gelijkspanning op een spoel heeft een lineaire verandering van de stroom door de spoel tot gevolg.
Dit wordt praktisch toegepast bij de beeldbuis in een TV-ontvanger. Men verkrijgt daar een zaagtandvormige *stroom* in de afbuigspoelen voor horizontale afbuiging door er een asymmetrische blok*spanning* op aan te sluiten.



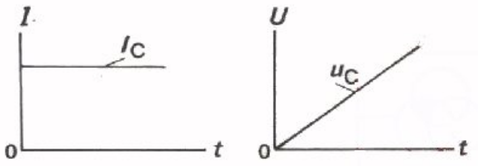
Vergelijk dit met de al eerder behandelde zaagtand*spannings*-generator. Daar werd een asymmetrische blok*stroom* aan een condensator toegevoerd.

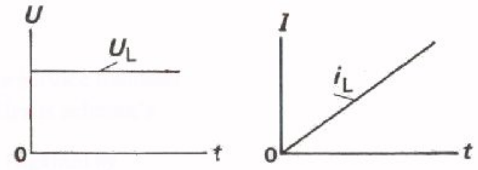
KORTE HERHALING

We zetten hier nog eens naast elkaar wat we voor de condensator en de spoel hebben gevonden.

- Een geladen condensator heeft energie in de vorm van zijn *elektrische veld* tussen de platen.
- Toevoeren van zuivere gelijk*stroom* aan de condensator doet zijn *spanning* lineair veranderen.

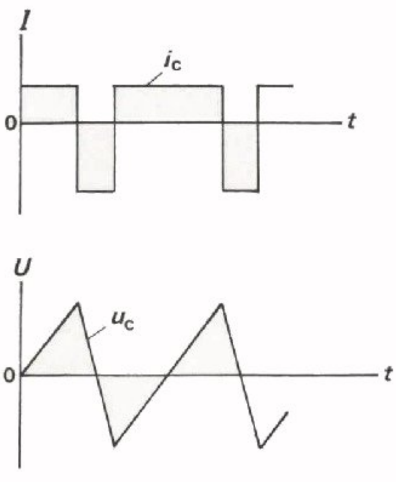
- Een stroomvoerende spoel heeft energie in de vorm van zijn *magnetische veld*, dat met de windingen is gekoppeld.
- Toevoeren van zuivere gelijk*spanning* aan een ideale spoel doet zijn *stroom* lineair veranderen.

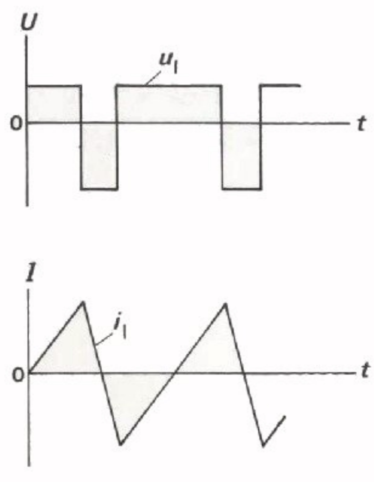




- Een bepaalde spanning ontstaat pas over een condensator nadat er enige tijd een stroom door heeft gelopen.
- Een zaagtand*spanning* ontstaat als men een asymmetrische blok*stroom* aan een condensator toevoert.

- Een bepaalde stroom ontstaat pas in een spoel nadat er enige tijd een spanning op de spoel is aangesloten.
- Een zaagtand*stroom* ontstaat als men een asymmetrische blok*spanning* aan een spoel toevoert.





DE CAPACITEIT VAN EEN CONDENSATOR

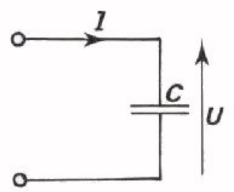
Bij behandeling van de condensator hebben we het gehad over de kenmerkende grootheid *capaciteit*, aangeduid met C. De capaciteit is de verhouding tussen de lading en de spanning van een condensator. Deze verhouding blijkt voor een gegeven condensator constant te zijn:

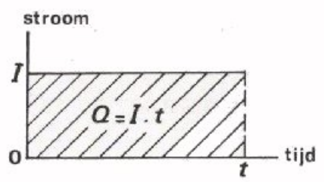
$$C = \frac{Q}{U} = \text{constant}$$

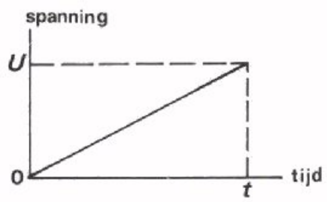
Het begrip "capaciteit" kunnen we als volgt nog nader bekijken.

Als we gedurende t seconden een zuivere gelijkstroom I aan een condensator toevoeren, dan voeren we een lading toe:

$$Q = I.t$$







Over de condensator is na t seconden een spanning opgebouwd, die we U noemen.

Voor de capaciteit $C = \frac{Q}{U}$ kunnen we dus ook schrijven: $\boxed{C = \frac{I.t}{U}}$

De capaciteit is blijkbaar de constante verhouding tussen de toegevoerde "stroom I maal tijd t" en de in t s opgebouwde spanning U.

Voorbeeld:

$I = 2 \text{ mA} = 2.10^{-3}$ A
$t = 3 \text{ ms} = 3.10^{-3}$ s.

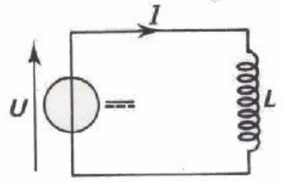
Na deze 3 ms blijkt de spanning U 120 V te zijn.
De capaciteit is dan:

$$C = \frac{I.t}{U} = \frac{(2.10^{-3}).(3.10^{-3})}{120} = \frac{1}{20} \cdot 10^{-6} \text{ F} = \frac{1}{20}\ \mu\text{F} = 0{,}05\ \mu\text{F}.$$

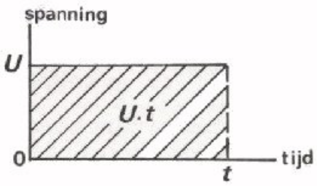
DE ZELFINDUCTIE VAN EEN SPOEL

We hebben het verhaal over de capaciteit van een condensator nog eens herhaald, omdat men bij een spoel op soortgelijke wijze kan redeneren.
Vooraf een belangrijke opmerking:

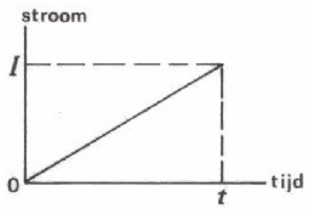
Wat bij de condensator voor de *stroom* geldt,
geldt bij de spoel voor de *spanning*.
Wat bij de condensator voor de *spanning* geldt,
geldt bij de spoel voor de *stroom*.
Condensator en spoel zijn in dit opzicht "tegengestelde componenten".



We zetten een constante spanning over een ideale spoel gedurende een tijd t.



We voeren aan de spoel een "gelijkspanning maal tijd" $U.t$ toe.



Door de spoel neemt de stroom lineair toe en heeft na t seconden een waarde I bereikt.

De verhouding van $U.t$ en I noemen we de *zelfinductie* van de spoel. Deze geven we aan met de hoofdletter L.

$$\boxed{L = \frac{U.t}{I}}$$

De zelfinductie is blijkbaar de constante verhouding tussen de toegevoerde "spanning U maal tijd t" en de na t s verkregen stroom.

Als *eenheid van zelfinductie* gebruikt men de "henry", afgekort met de hoofdletter H.
Drukt men in de formule: $L = \frac{U.t}{I}$

de spanning U uit in volt,
de tijd t in seconden en
de stroom I in ampere,

dan vindt men L in henry.

Voorbeeld: $U = 20$ V, $t = 4$ ms $= 4.10^{-3}$ s.

Na deze 4 ms blijkt de stroom $I = 5$ mA $= 5.10^{-3}$ A te zijn.

De zelfinductie is dan: $L = \frac{U.t}{I} = \frac{20.(4.10^{-3})}{5.10^{-3}} = 16$ H.

DE NAAM "ZELFINDUCTIE"

Men kan zich afvragen waarom het begrip $L = \frac{U.t}{I}$ de naam "zelfinductie" heeft gekregen.
Het is niet gemakkelijk om dit uit te leggen. We zullen hier een poging doen.

Een spoel bestaat uit een stuk geïsoleerd koperdraad dat opgewikkeld is. Sluiten we een gelijkspanning aan op een stuk nog niet opgewonden draad, dan gaat er meteen een grote gelijkstroom lopen; de stroom neemt dus van nul af plotseling toe. Wikkelen we dit stuk draad tot een spoel, dan zal er weer dezelfde grote stroom willen gaan lopen, als we er dezelfde gelijkspanning op aansluiten. De stroom in de spoel neemt nu echter veel langzamer toe.
Hoe komt dit? Een veranderende stroom wekt een veranderend magnetisch veld in de spoel op, dat met de spoel *zelf* is gekoppeld. De eigen toenemende magnetische flux wekt in de spoel een inductiespanning op, die men "de spanning van *zelfinductie*" zou kunnen noemen. Het is deze spanning, die de stroomverandering tegenwerkt. De stroom zal daarom pas na enige tijd de waarde bereiken,die in de niet opgewonden koperdraad al meteen wordt bereikt.
Hoe sterk de tegenwerking bij het aangroeien van de stroom is,hangt af van de sterkte van de verandering van het eigen magnetische veld.
Bepalend hiervoor zijn:

- Het aantal windingen.

  Bij meer windingen is het opgewekte magnetische veld groter.
- De aanwezigheid van een ijzerkern in de spoel.

  IJzer in de spoel versterkt immers het magnetische veld.

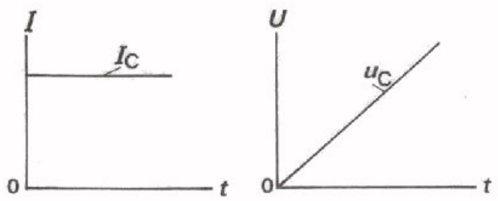
Een spoel met weinig windingen heeft een kleinere *zelfinductie* dan een met veel windingen. Een spoel met ijzerkern heeft een grotere *zelfinductie* dan een zonder ijzerkern.

Een maat waarin de eigenschappen van de spoel tot uitdrukking worden gebracht is de *coëfficiënt van zelfinductie*, die men meestal kortweg de *zelfinductie* L van de spoel noemt. We hebben reeds vermeld dat men L meet in henry, H.

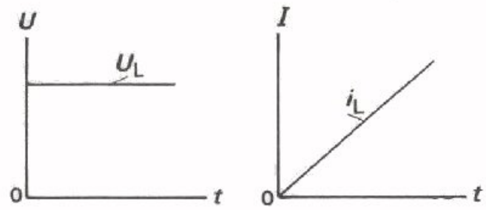
SAMENVATTING

- Een *spoel* heeft eigenschappen die in menig opzicht tegengesteld zijn aan die van de *condensator*.

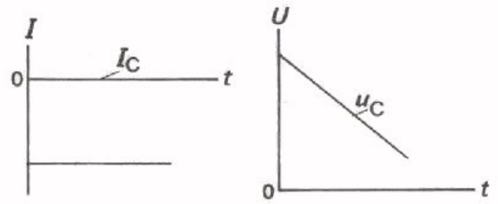
CONDENSATOR	SPOEL
• Toevoeren van zuivere gelijk-*stroom* doet de spanning over de condensator *lineair* veranderen.	• Toevoeren van zuivere gelijk-*spanning* doet de stroom over de spoel *lineair* veranderen.



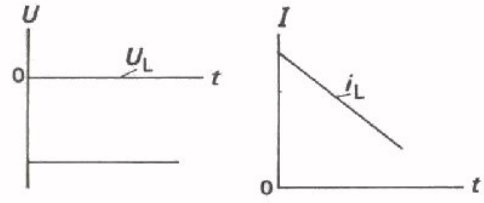
laden



aangroeien van de stroom



ontladen



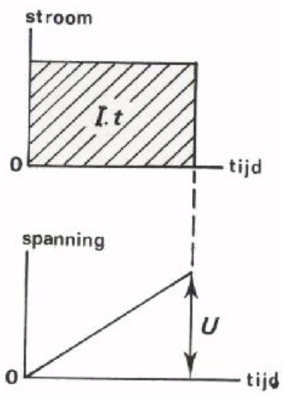
afnemen van de stroom

CONDENSATOR	SPOEL
• Bij het *laden* voert men *energie* toe. Deze wordt opgeslagen in het *elektrische veld* tussen de platen.	• Bij het laten *aangroeien van de stroom* voert men *energie* toe. Deze wordt opgeslagen in het *magnetische veld* dat men de wikkelingen is gekoppeld.
• Het kost tijd de energie voor de opbouw van het elektrische veld toe te voeren.	• Het kost tijd de energie voor de opbouw van het magnetische veld toe te voeren.

CONDENSATOR

- Aan een condensator moet men eerst enige tijd stroom toevoeren alvorens de spanning een bepaalde waarde heeft bereikt: stroomtoevoer gaat aan spanningsopbouw vooraf.
- Bij het laden voert men "stroom maal tijd" $I.t$ toe, waardoor de spanning U aangroeit.
- Voor een bepaalde condensator is de verhouding $\frac{I.t}{U}$ constant. Dit is de capaciteit.

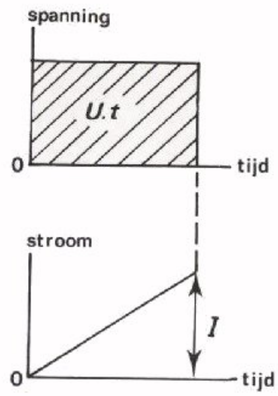
$$C = \frac{I.t}{U}$$



SPOEL

- Aan een spoel moet men eerst enige tijd spanning toevoeren alvorens de stroom een bepaalde waarde heeft bereikt: spanningstoevoer gaat aan stroomopbouw vooraf.
- Bij het laten aangroeien van de stroom voert men "spanning maal tijd" $U.t$ toe.
- Voor een bepaalde spoel is de verhouding $\frac{U.t}{I}$ constant. Dit is de zelfinductie.

$$L = \frac{U.t}{I}$$



NAAM: [ ] KLAS: [ ]

1. Als men aan een condensator gedurende 50 µs een stroom toevoert van 30 mA, verkrijgt hij een spanning van 15 V. Bereken zijn capaciteit.

$C =$ [ ]

2. Als men aan een ideale spoel gedurende 10 *n* s een spanning toevoert van 400 V, groeit de stroom aan van 0 tot 16 mA. Bereken de zelfinductie van de spoel.

$L =$ [ ]

3. De capaciteit van een condensator is 1 farad, als bij het toevoeren van 1 A gedurende 1 s de spanning toeneemt van 0 V tot:

[ ] V

4. De zelfinductie van een spoel is 1 henry, als bij het toevoeren van 1 V gedurende 1 s de stroom toeneemt van 0 A tot:

[ ] A

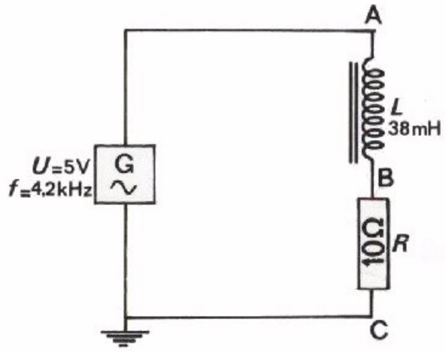
A 48 DE SPOEL EN WISSELSPANNING

- We hebben gezien, dat een spoel gekenmerkt wordt door zijn *zelfinductie*. De eenheid van zelfinductie is de "henry", H.

- De grootte van de zelfinductie hangt af van het aantal windingen van de spoel en van het materiaal waaruit de kern bestaat.

In de elektronica is vooral het gedrag van een spoel bij wisselspanning van belang. In deze les gaan we dit gedrag onderzoeken.

OPDRACHT: WISSELSPANNING OP EEN SPOEL



- Bouw deze schakeling en voer een *sinusvormige* wisselspanning toe van 5 V - 4,2 kHz.

- In deze schakeling is voor het meten van de stroom door de spoel een meetweerstandje R = 10 Ω in serie met de spoel geplaatst. Hierdoor verandert de stroom door de spoel niet merkbaar, dus is u_{AB} praktisch gelijk aan u_{AC}.

- Voer u_{AB} toe aan een oscilloscoop en maak ongeveer twee perioden van deze wisselspanning zichtbaar.

  U ziet nu de *spanning* over de spoel.

- Voer $u_{BC} = R.i$ toe aan de oscilloscoop en maak weer ongeveer twee perioden van de wisselspanning zichtbaar. U ziet het verloop van de *stroom* door de spoel.

Op de oscilloscoop hebben we nu achtereenvolgens een beeld gezien van de spanning over de spoel en de stroom door de spoel. Bij toevoer van een sinusvormige spanning blijkt de stroom ook sinusvormig te verlopen.

Conclusie:

Een *sinusvormige spanning* over een spoel doet door de spoel een eveneens *sinusvormige stroom* lopen.

Bedenk nog eens dat dit bij de condensator juist zo was. Ook bij een condensator veroorzaakt een sinusvormige spanning een sinusvormige stroom.

DE REACTANTIE VAN EEN SPOEL

We weten nu dat er een sinusvormige wisselstroom door een spoel loopt, als we deze aansluiten op een sinusvormige wisselspanning. De spoel gedraagt zich als een z.g. *wisselstroomweerstand.*

Juist zoals bij de condensator noemt men de wisselstroomweerstand van een spoel de *reactantie X.*

Om onderscheid te maken tussen de reactantie van een condensator en die van een spoel voorzien we de X van een letter op de volgende manier:

X_C = reactantie condensator,
X_L = reactantie spoel.

De reactantie van een spoel is dus:

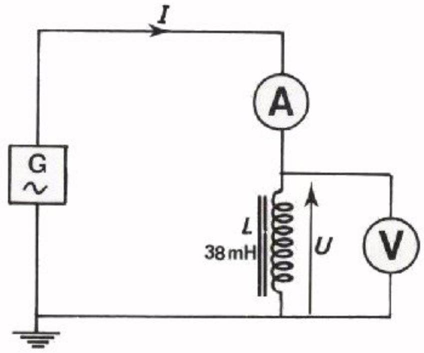
$$\boxed{X_L = \frac{u}{i}}$$

De reactantie wordt gemeten in ohm, Ω. Voor u en i in bovenstaande formule kan men de amplitude nemen: $X_L = \frac{U_t}{I_t}$.

Men kan ook voor beide de effectieve waarde gebruiken: $X_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$.

In volgende opdracht gaan we de reactantie van spoelen meten.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE REACTANTIE



- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel.
- We gaan nu bij een aantal frequenties verschillende wisselstromen toevoeren. We meten dan telkens de wisselspanning over en de wisselstroom door de spoel en berekenen:

$$X_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

In volgende tabel staan de frequenties en de stromen,die we toevoeren, vermeld. Meet telkens U_{eff} en bereken X_L.

f (Hz)	I_{eff} (mA)	U_{eff} (V)	X_L (Ω)
420	10		
420	20		
420	30		
840	10		
1680	10		

CONCLUSIES

De reactantie X_L is onafhankelijk van de grootte van de wisselstroom of -spanning.

De reactantie X_L
- blijft gelijk als de frequentie hetzelfde is
- wordt tweemaal zo groot,als de frequentie tweemaal zo groot wordt
- wordt driemaal zo groot,als de frequentie driemaal zo groot wordt.

De grootte van de reactantie X_L is evenredig met de frequentie.

OPDRACHT: HET METEN VAN X_L VAN EEN SPOEL MET EEN GROTERE L

- Vervang in de schakeling van vorig blad de spoel van 38 mH door een spoel van 76 mH.

- Voer nu metingen uit aan de hand van onderstaande tabel. Bereken de reactantie X_L.

f (Hz)	I_{eff} (mA)	U_{eff} (V)	X_L (Ω)
1680	10		
3360	10		

CONCLUSIES

- Ook nu is de reactantie groter bij een hogere frequentie.
- Bij dezelfde frequentie is de reactantie van een spoel met een grote zelfinductie groter, dan die van een kleine.

Hoe groter de zelfinductie van de spoel, des te groter de reactantie.

DE REACTANTIE VAN X_L IN FORMULE

In de voorafgaande twee opdrachten zagen we, dat de reactantie van een spoel:

- bij een 2x zo hoge frequentie 2x zo groot is,
- bij een 2x zo grote zelfinductie 2x zo groot is.

Met behulp van de wiskunde kan men voor de reactantie de volgende formule afleiden:

$$X_L = 2\pi f.L = \omega L$$

X_L: reactantie, Ω
f : frequentie, Hz
L : zelfinductie, H.

In de volgende oefeningen controleren we of onze metingen in overeenstemming zijn met deze formule.

OEFENINGEN

1.

L	f (Hz)	$\omega = 2\pi f$	$X_L = \omega L$ (Ω)
38 mH	420		
38 mH	840		
38 mH	1680		

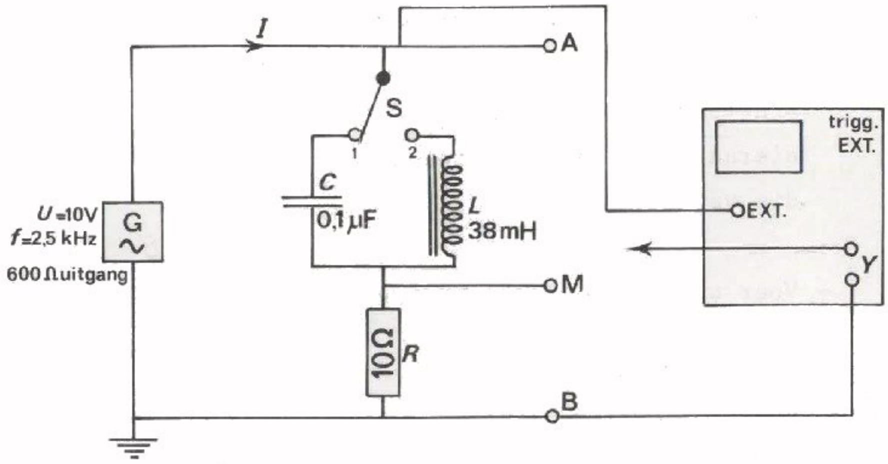
2.

L	f (Hz)	$\omega = 2\pi f$	$X_L = \omega L$ (Ω)
76 mH	1680		
76 mH	3360		

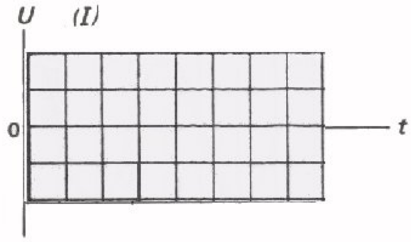
Klopt dit met uw metingen?

OPDRACHT: HET BEKIJKEN VAN DE FASE VAN WISSELSPANNING EN -STROOM BIJ EEN SPOEL

We weten dat bij een condensator de stroom 90^0 voorijlt op de spanning. In volgende opdracht gaan we onderzoeken hoe dit bij de spoel zit. We vergelijken daarbij de spoel met de condensator.



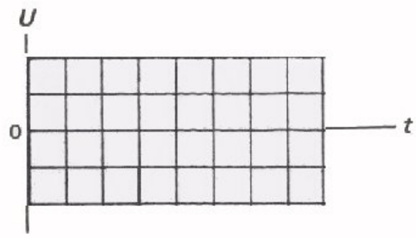
- Bouw deze schakeling op het paneel. Zet "TRIGGERING" op "MEAN", "+" en "EXT". Zet de ingangsschakelaar op "AC". Maak de verbinding met de "TRIGG"-bus.
- Stel de LF-generator in op $U \approx 10$ V bij $f \approx 2{,}5$ kHz en gebruik de 600 Ω-uitgang.
- Zet S in stand 1. Om de stroom i te kunnen meten wordt de spanning u_{MB} gemeten over een kleine meetweerstand van 10 Ω.
  Voer u_{MB} aan de oscilloscoop toe en maak circa twee perioden zichtbaar.
- Schets de grafiek van u_{MB} hiernaast. Deze komt overeen met die van I.



  Opmerking:

  Omdat de weerstand van 10 Ω klein is t.o.v. X_L of X_C kan u_{AM} praktisch worden gelijkgesteld aan u_{AB}.

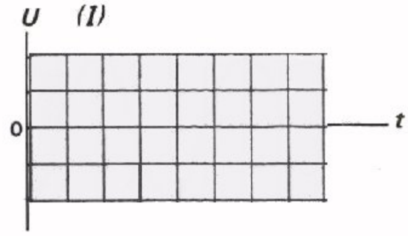
- Voer de spanning u_{AB} aan de oscilloscoop toe. U ziet nu de spanning over de condensator.



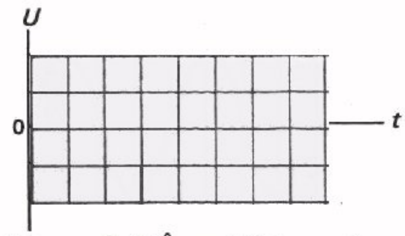
- Schets de grafiek van de spanning over de condensator hiernaast.

Bij deze meting hebben we nog eens gezien dat de stroom i bij een condensator 90^0 *voorijlt* op de spanning u.

- Verander niets aan de instelling van de oscilloscoop en zet S in stand 2. We gaan nu op dezelfde manier stroom en spanning bij een spoel zichtbaar maken.



- Voer u_{MB} aan de oscilloscoop toe.
- Schets de grafiek van u_{MB} hiernaast. Deze komt overeen met die van i.

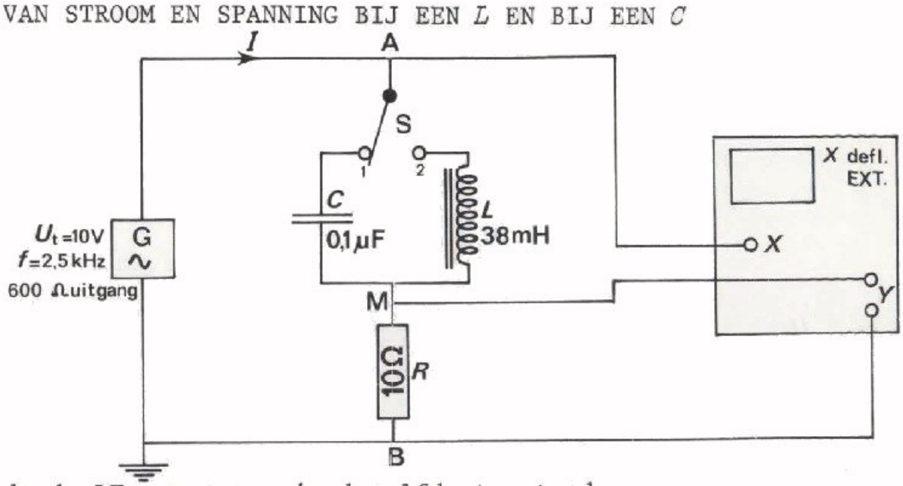


- Voer u_{AB} aan de oscilloscoop toe.
- Schets de grafiek van de spanning over de spoel u_{AB}.

Uit de meting blijkt dat bij een spoel de stroom i 90^0 *naijlt* op de spanning u. Dit is juist tegengesteld aan het geval van de condensator.

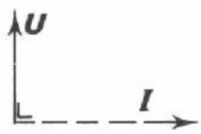
- Breek de schakeling nog niet af.

OPDRACHT: FASE VAN STROOM EN SPANNING BIJ EEN *L* EN BIJ EEN *C*



- Houdt de LF-generator in dezelfde toestand.
- Wijzig de instelling van de oscilloscoop en de aansluitingen op de oscilloscoop volgens bovenstaand schema.
- Voer nu u_{MB} (overeenkomend met i) aan de Y-ingang en u_{AB} aan de X-ingang van de oscilloscoop toe.

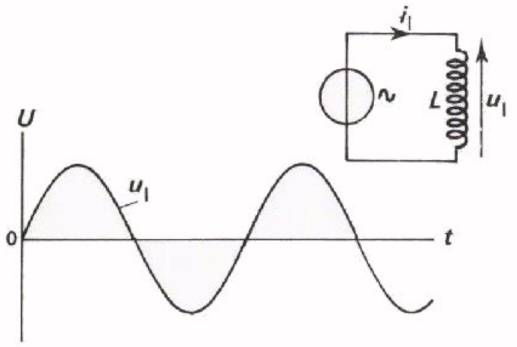
  Er ontstaat op het scherm een figuur van Lissajous.
  Deze figuur is een "rechte ellips".
  Dit betekent dat ***I*** en ***U*** bij de spoel 90° in fase verschoven zijn.



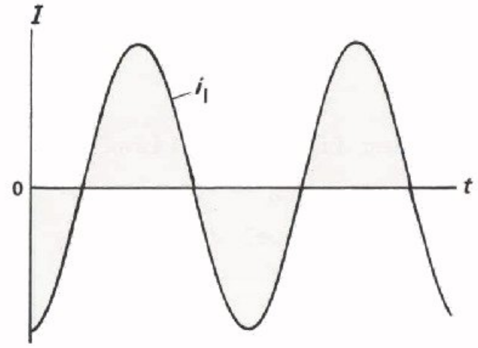
- Zet de schakelaar S in stand 1 en herhaal de proef voor de condensator.

BIJ EEN SPOEL IJLT DE WISSELSTROOM 90^0 NA OP DE WISSELSPANNING

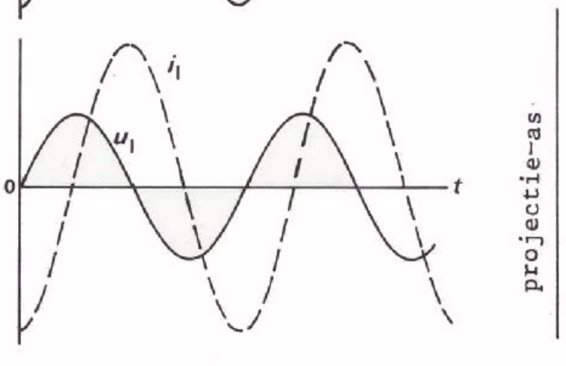
In de opdracht hebben we geconstateerd dat bij een spoel de wisselstroom 90^0 naijlt op de wisselspanning. We zetten dit nogmaals bij elkaar.



Dit is de grafiek van de momentele waarde van een sinusvormige wisselspanning over een spoel L.



Dit is de grafiek van de momentele waarde van de bijbehorende sinusvormige wisselstroom door de spoel.





tijdstip t = 0

Hierboven is het verloop van de spanning en de stroom bij een spoel in een grafiek weergegeven. Daarnaast staat het bijbehorend vectordiagram op tijdstip t = 0. Op het moment dat de projectie van i_1 maximaal negatief is, is de projectie van u_1 gelijk aan nul. In dit vectordiagram is duidelijk te zien, dat de stroom 90^0 naijlt op de spanning.

DE VOORNAAMSTE EIGENSCHAPPEN VAN CONDENSATOR EN SPOEL KORT SAMENGEVAT

- Bij een *condensator* ijlt de *stroom* 90^0 *voor* op de *spanning*.

  Een condensator is een soort vat dat eerst vol moet stromen.

- Bij een *spoel* ijlt de *stroom* 90^0 *na* op de *spanning*.

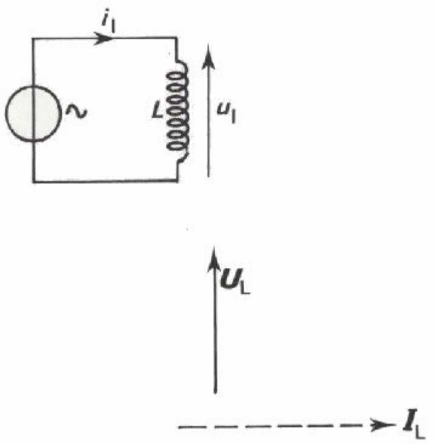
  Bij een spoel kan de stroom niet plotseling groot worden; er moet eerst spanning zijn om de stroom te doen ontstaan en aan te laten groeien.

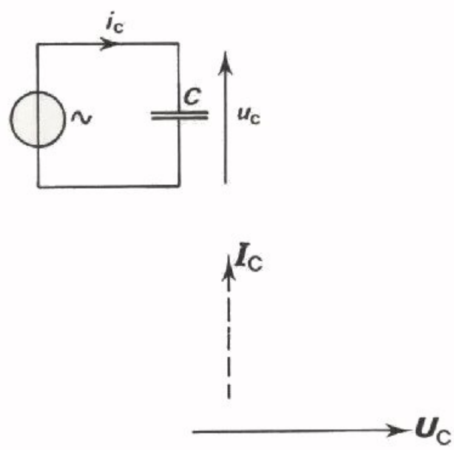
Om dit te onthouden maakt men wel gebruik van het volgend "ezelsbruggetje". Onthoud het woord:

" L U I C I U "

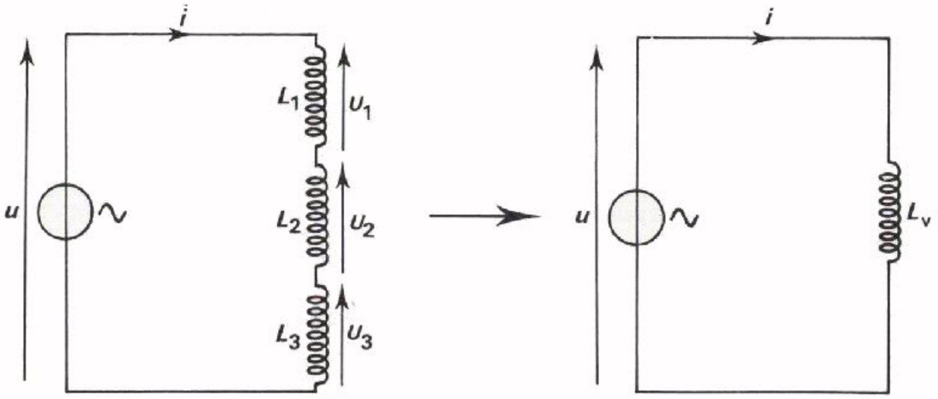
Bij *L* eerst *U*, dan *I*. Bij *C* eerst *I*, dan *U*.

- Met behulp van vectoren kan de fase van sinusvormige spanning en stroom bij *L* en *C* eenvoudig worden weergegeven.





SERIESCHAKELING VAN SPOELEN



Reeds eerder hebben we geleerd, dat bij serieschakeling van weerstanden geldt, dat de vervangingsweerstand bedraagt:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + ---$$

Ook hebben we gezien, dat bij serieschakeling van condensators geldt, dat de vervangings*reactantie* gelijk is aan:

$$X_{Cs} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + ---$$

Voor spoelen blijkt hetzelfde te gelden:

De vervangingsreactantie van een aantal in serie geschakelde spoelen is:

$$\boxed{X_{Ls} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + ---}$$

Aangezien: $X_{Ls} = \omega L_s$

$X_{L_1} = \omega L_1$

$X_{L_2} = \omega L_2$

$X_{L_3} = \omega L_3$,

kunnen we schrijven:

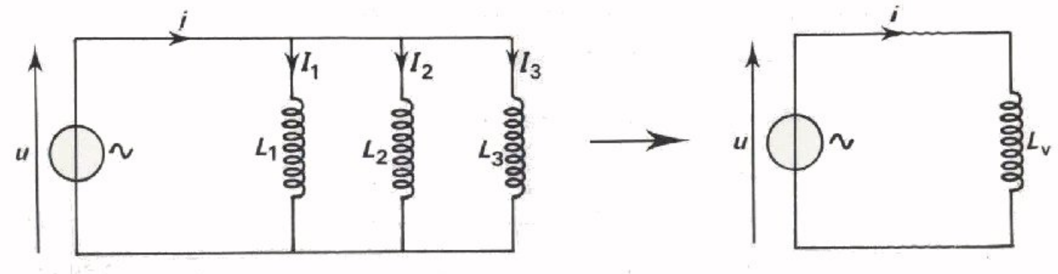
$$\omega L_s = \omega L_1 + \omega L_2 + \omega L_3 + ---$$

Of, na deling door ω:

$$\boxed{L_s = L_1 + L_2 + L_3 + ---}$$

De vervangingszelfinductie van in serie geschakelde spoelen is gelijk aan de som van de afzonderlijke zelfinducties. De vervangingszelfinductie is hier dus groter dan de grootste zelfinductie.

PARALLELSCHAKELING VAN SPOELEN



Reeds eerder leerden we, dat bij parallelschakeling van weerstanden geldt:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ---$$

Voor condensators die parallel geschakeld zijn geldt evenzo voor de *reactanties*:

$$\frac{1}{X_{Cp}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} + ---$$

Voor spoelen blijkt hetzelfde te gelden:

De vervangingsreactantie voor een aantal parallel geschakelde spoelen kan men vinden met:

$$\boxed{\frac{1}{X_{Lp}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + ---}$$

Aangezien: $X_{Lp} = \omega L_p$

$X_{L_1} = \omega L_1$

$X_{L_2} = \omega L_2$

$X_{L_3} = \omega L_3$,

kunnen we schrijven:

$$\frac{1}{\omega L_p} = \frac{1}{\omega L_1} + \frac{1}{\omega L_2} + \frac{1}{\omega L_3} + ---$$

Of, na vermenigvuldiging met ω:

$$\boxed{\frac{1}{L_p} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + ---}$$

De vervangingszelfinductie is nu dus kleiner dan de kleinste zelfinductie.

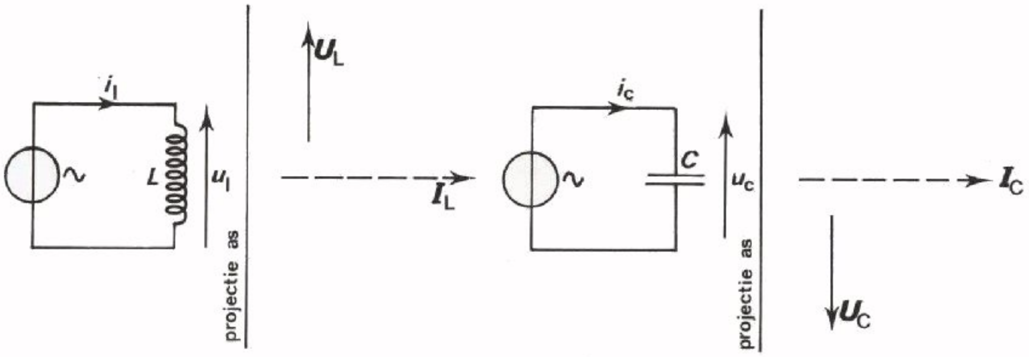
SAMENVATTING

- Een sinusvormige op een spoel aangesloten spanning veroorzaakt een eveneens sinusvormige stroom door die spoel.
- De reactantie van een spoel is:

$$X_L = 2\pi f L = \omega L$$

X_L : reactantie
f : frequentie, Hz
L : zelfinductie, H
ω : $2\pi f$

- Bij een spoel ijlt de spanning 90^0 voor op de stroom. Bij een condensator ijlt de spanning 90^0 na op de stroom. Dit is gemakkelijke te onthouden aan de hand van het woord: "LUICIU".



- Voor in serie geschakelde spoelen geldt (evenals voor in serie geschakelde condensators):

$$X_s = X_1 + X_2 + X_3 \text{ ---}$$

- Voor parallel geschakelde spoelen geldt (evenals voor parallel geschakelde condensators):

$$\frac{1}{X_p} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \text{ ---}$$

NAAM: ______ KLAS: ______

OEFENINGEN

1. Bereken de reactanties van de volgende spoelen bij de gegeven frequenties:

$L_1 = 10\ \text{mH}$	$f = \frac{200}{\pi}\ \text{kHz}$	$X_{L_1} =$ ______ Ω
$L_2 = 6\ \mu\text{H}$	$f = \frac{400}{\pi}\ \text{MHz}$	$X_{L_2} =$ ______ Ω
$L_3 = 2\ \text{H}$	$f = \frac{200}{\pi}\ \text{Hz}$	$X_{L_3} =$ ______ Ω

2. Drie in serie geschakelde spoelen:

$L_1 = 200\ \text{mH}$

$L_2 = 80\ \text{mH}$

$L_3 = 0{,}2\ \text{H}$

kunnen vervangen worden door een spoel: $L_s =$ ______ mH

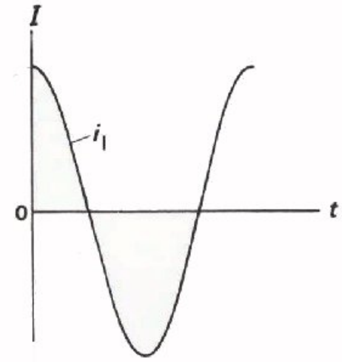
3. Twee parallel geschakelde spoelen:

$L_1 = 400\ \text{mH}$

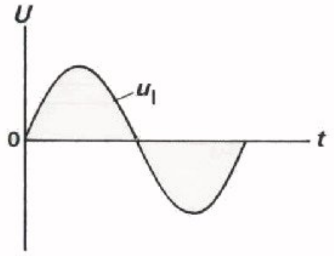
$L_2 = 600\ \text{mH}$

kunnen vervangen worden door een spoel: $L_p =$ ______

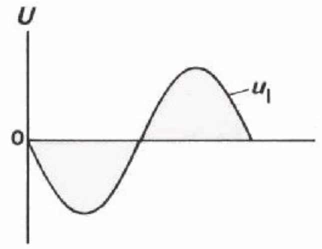
4. Door een spoel gaat een stroom van volgende vorm:



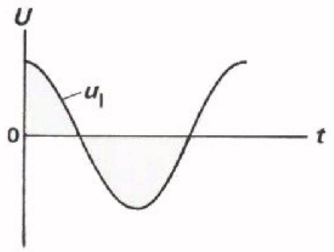
De bijbehorende spanning verloopt als volgt:



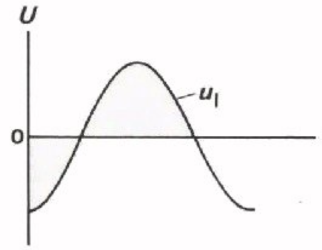
O



O



O



O

5. Door 4 gelijke spoelen in serie te schakelen verkrijgt men een

[ ] maal zo [grote / kleine] zelfinductie.

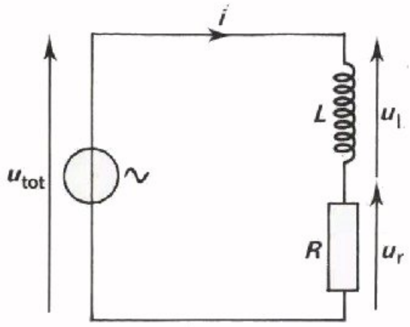
Door 3 gelijke spoelen parallel te schakelen verkrijgt men een

[ ] maal zo [grote / kleine] zelfinductie.

A 49 *L-R*- COMBINATIES

Tot nu toe hebben we de eigenschappen van een spoel beschouwd voor het geval,dat we deze spoel alleen of samen met andere spoelen gebruiken.
In de praktische elektronica komt een spoel altijd in combinatie met een weerstand voor. De windingen van een spoel hebben immers zelf altijd al enige weerstand. Weliswaar heeft deze weerstand in sommige gevallen zo weinig invloed,dat we hem wel mogen verwaarlozen, maar hij is altijd aanwezig.
In deze les gaan we het gedrag bekijken van combinaties van spoel en weerstand.

SERIESCHAKELING VAN L EN R

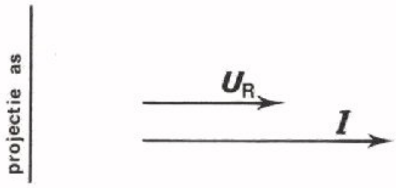


Hier is een serieschakeling van een spoel en een weerstand getekend. Om een inzicht te krijgen in deze schakeling, gaan we het vectordiagram tekenen.

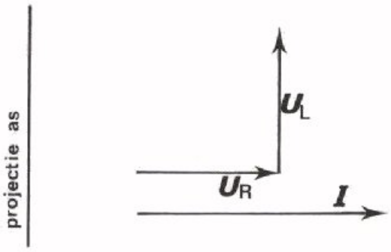
Voor het gemak nemen we aan dat $X_L = R$.

We hebben hier te maken met een serieschakeling. De stroom is in een serieschakeling door iedere component dezelfde. Deze gemeenschappelijke stroomvector zetten we horizontaal uit.

De spanning over de weerstand u_r is in fase met de stroom i, zodat deze spanningsvector ook horizontaal wordt uitgezet.



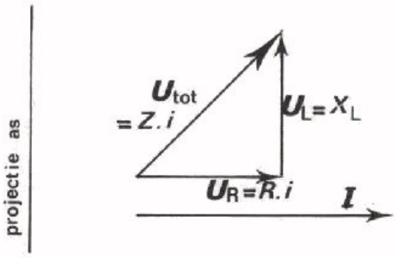
De spanning over de spoel u_l ijlt 90^0 voor op de stroom.
Deze spanningsvector moet dus verticaal naar boven worden getekend.
Omdat we aangenomen hebben, dat $X_L = R$, geldt:



$$X_L . i = R . i \quad \text{of} \quad u_L = u_R .$$

De vector $\boldsymbol{U}_L$ heeft dus dezelfde lengte als de vector $\boldsymbol{U}_R$.

De totale spanning vinden we door de vectoren $\boldsymbol{U}_R$ en $\boldsymbol{U}_L$ samen te stellen.



Voor de drie spanningen geldt

$$u_R = R.i$$
$$u_L = X_L.i$$
$$\text{en} \quad u_{tot} = Z.i$$

Z is de *impedantie* van de schakeling.

Met de stelling van Pythagoras volgt uit het vectordiagram

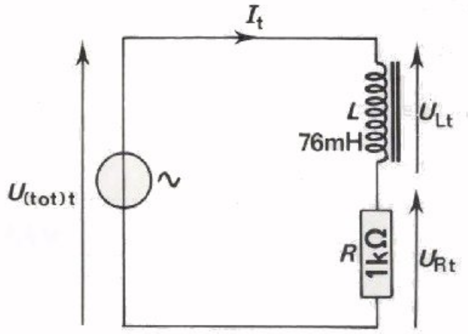
$$U_{(tot)t}{}^2 = U_{Rt}^2 + U_{Lt}^2$$

$$(Z.I_t)^2 = (R.I_t)^2 + (X_L.I_t)^2$$

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

OPDRACHT: METEN AAN EEN SERIESCHAKELING VAN *R* EN *L*



- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel.
- Stel $U_{(tot)t}$ in op 1,4 V bij een frequentie van 2100 Hz met behulp van een oscilloscoop.
- Meet met behulp van de oscilloscoop de spanning over de weerstand *R*.

U_{Rt} = [ ]

- Bereken de stroom $I_t = \frac{U_{Rt}}{R} =$ [ ]
- Meet de spanning over de spoel

U_{Lt} = [ ]

- We kunnen de reactantie van de spoel nu bepalen uit

$X_L = \frac{U_{Lt}}{I_t} =$ [ ]

- De impedantie van de schakeling $Z = \frac{U_{(tot)t}}{I_t}$ is

Z = [ ]

We hebben nu X_L en Z met behulp van de meetresultaten bepaald. We kunnen ze ook berekenen uit de verstrekte gegevens.

- We kunnen deze reactantie berekenen met

$X_L = \omega L$

$\omega = 2\pi f = 2\pi.2100$ en $L = 76$ mH

Hieruit volgt $X_L \approx$ [ ]

- We kunnen Z berekenen met behulp van de formule $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

Dit levert Z = [ ]

- Kloppen de met de meetresultaten bepaalde X_L en Z met de waarden die zijn berekend uit de gegevens?
- Breek de schakeling niet af.

OPDRACHT: METEN AAN EEN SERIESCHAKELING VAN R EN L BIJ EEN ANDERE FREQUENTIE

In deze opdracht gaan we aan dezelfde schakeling dezelfde metingen verrichten maar bij een lagere frequentie.

- Zet de generator op een frequentie van 1050 Hz en stel hem zo in, dat de spanning over de weerstand U_{Rt} = 1 V.
- Bereken $I_t = \frac{U_{Rt}}{R}$ — I_t =
- Meet U_{Lt} — U_{Lt} =
- Bepaal $X_L = \frac{U_{Lt}}{I_t}$ — X_L =
- Meet $U_{(tot)t}$ — $U_{(tot)t}$ =
- Bepaal $Z = \frac{U_{(tot)t}}{I_t}$ — Z =
- Bereken Z ook met behulp van de verstrekte gegevens.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} =$$

- Teken hieronder op schaal het vectordiagram voor dit geval. Teken ernaast op dezelfde schaal het vectordiagram voor de meting op het vorig blad.

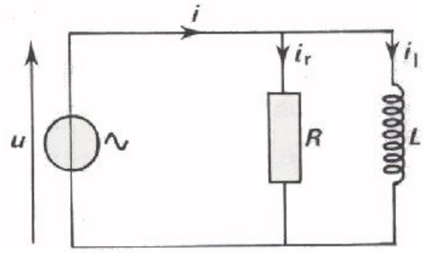
Vectordiagram bij 1050 Hz

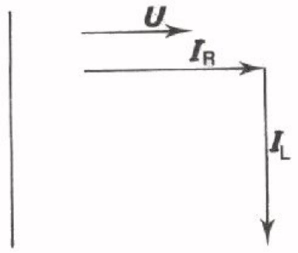
Vectordiagram bij 2100 Hz

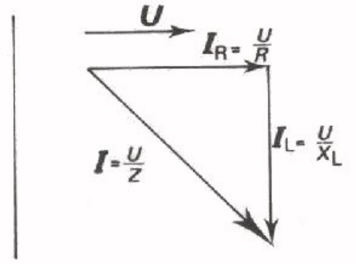
- Merk op, dat bij een andere frequentie het vectordiagram ook anders wordt. Dat komt omdat $X_L = \omega L = 2\pi f L$ dan een andere waarde heeft. Ga dit na.

PARALLELSCHAKELING VAN L EN R

We zullen vervolgens de parallelschakeling van een spoel en een weerstand gaan beschouwen.







We tekenen eerst weer het vectordiagram. De gemeenschappelijke grootheid is hier de spanning. We beginnen daarom de spanningsvector $\boldsymbol{U}$ horizontaal uit te zetten. De stroom door de weerstand $\boldsymbol{I}_R$ is in fase met de spanning en wordt dan ook horizontaal uitgezet.

De stroom door de spoel $\boldsymbol{I}_L$ ijlt 90^0 na op de spanning, zodat deze stroomvector naar beneden moet wijzen.

Voor het gemak hebben we weer aangenomen, dat $X_L = R$.

De stromen i_L en i_R zijn dus even groot en de bijbehorende vectoren even lang.

De totale stroom $\boldsymbol{I}_{tot}$ vinden we door $\boldsymbol{I}_R$ en $\boldsymbol{I}_L$ vectorisch op te stellen:

Verder geldt:

$$i_r = \frac{u}{R}$$

$$i_l = \frac{u}{X_L}$$

$$i_{tot} = \frac{u}{Z}.$$

Met de stelling van Pythagoras volgt uit het vectordiagram:

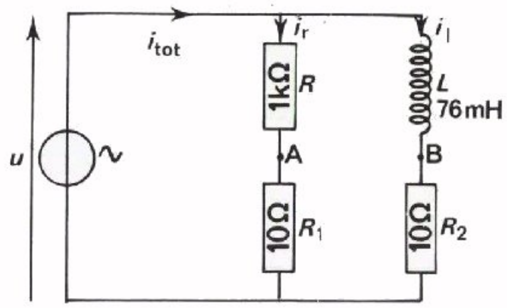
$$I^2_{(tot)t} = I^2_{rt} + I^2_{lt}$$

$$\left(\frac{U_t}{Z}\right)^2 = \left(\frac{U_t}{R}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{X_L}\right)^2$$

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}$$

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$$

OPDRACHT: METEN AAN EEN PARALLELSCHAKELING VAN R EN L



- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel. De weerstanden R_1 en R_2 zijn meetweerstanden. Zij zijn aangebracht om de stromen door L en R te kunnen meten. Zij zijn zo klein ten opzichte van R, resp. X_L, dat de stromen in de schakeling er nagenoeg niet door veranderen.

- Voer een wisselspanning u van 2100 Hz toe en stel U_t met behulp van de oscilloscoop in op 2 V.

- Trigger de oscilloscoop extern met behulp van U_t.

  Meet:

  $U_{r_1 t}$ = [20mV] Hieruit volgt: $I_{Rt} = \frac{U_{r_1 t}}{R_1}$ = [ ]

- Meet:

  $U_{r_2 t}$ = [ ] Hieruit volgt: $I_{Lt} = \frac{U_{r_2 t}}{R_2}$ = [ ]

- Bepaal X_L met: $X_L = \frac{U_t}{I_{Lt}}$ = [ ]

- Verbind de punten A en B in de schakeling. De totale meetweerstand is nu 5 Ω. Door deze meetweerstand loopt de totale stroom $I_{(tot)t}$. Bepaal deze stroom met behulp van de oscilloscoop.

  $I_{(tot)t}$ = [ ]

- Bepaal nu Z als $\frac{U_t}{I_{(tot)t}}$ = [ ]

- We kunnen X_L en Z ook weer berekenen uit de gegevens.

  Bereken:

  $X_L = \omega L$ = [ ]

- Bereken : $\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}}$

  $\frac{1}{Z}$ = [ ]

  Z = [ ]

Kloppen de met meten bepaalde waarden van X_L en Z met de berekende waarden?

OPDRACHT: METEN AAN EEN PARALLELSCHAKELING VAN L EN R BIJ EEN ANDERE FREQUENTIE

In de volgende opdracht gaan we dezelfde metingen verrichten aan dezelfde schakeling, maar bij een andere frequentie.

- Zet de generator op een frequentie van 1050 Hz bij een spanning U_t = 2 V.
- Meet nu weer op dezelfde manier als bij de vorige opdracht.

I_{rt} =

I_{1t} =

$I_{(tot)t}$ =

- Bepaal de reactantie van de spoel uit:

$$X_L = \frac{U_t}{I_{1t}} =$$

- Bepaal Z uit: $\frac{U_t}{I_{(tot)t}} =$

- Teken hieronder op dezelfde schaal het vectordiagram bij 1050 Hz en bij 2100 Hz.

Vectordiagram bij 1050 Hz

Vectordiagram bij 2100 Hz

- Deze vectordiagrammen zijn verschillend. Waarom?

VERMOGEN IN EEN SPOEL

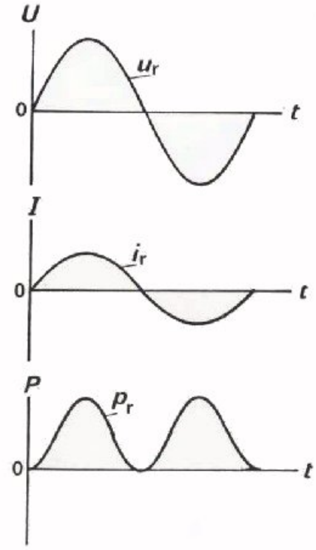
Bij een condensator is het vermogen van een wisselstroom al ter sprake gekomen. We hebben toen gezien, dat algemeen geldt:

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

- We weten dat in een *weerstand* over een hele periode gemiddeld een vermogen wordt ontwikkeld, dat gelijk is aan:

$$P_R = U_{eff} \cdot I_{eff} = \frac{1}{2} U_t \cdot I_t$$

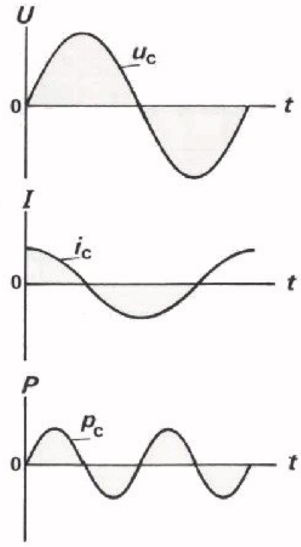
Ter herinnering staan hiernaast nogmaals de grafieken voor wisselspanning, -stroom en -vermogen bij een weerstand.



- We weten ook dat in een *condensator* over een hele periode gemiddeld een vermogen wordt ontwikkeld dat gelijk is aan nul.

$$P_{c(gem)} = 0$$

In de ene kwart periode wordt aan de condensator energie geleverd en in de volgende kwart periode geeft hij deze energie weer af.
De oorzaak van dit verschijnsel is de 90^0 faseverschil tussen stroom en spanning bij een condensator.
Uit de grafieken voor wisselspanning, -stroom en -vermogen hiernaast blijkt dit.



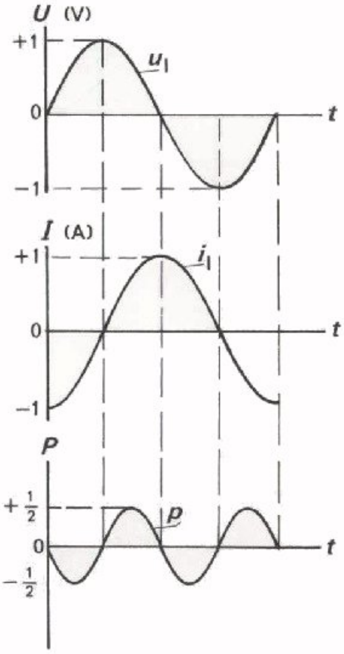
Aangezien ook bij een *spoel* stroom en spanning 90^0 in fase verschoven zijn, moet het in een periode ontwikkelde vermogen bij een spoel gemiddeld nul zijn. De algemene formule:

$$P = U_{eff} . I_{eff} . \cos \varphi$$

levert bij een spoel ook nul op; φ is immers 90^0 en $\cos \varphi$ is dus gelijk aan nul.

Evenals bij een condensator is het vermogen *gemiddeld* over een periode nul. Het vermogen is echter niet op elk moment gelijk aan nul.

Juist zoals bij de condensator kunnen we dit laten zien aan de hand van de grafieken van spanning en stroom.
Hiernaast zijn deze grafieken getekend.
Voor het gemak is aangenomen dat de amplitude van de spanning 1 V is en die van de stroom 1 A.



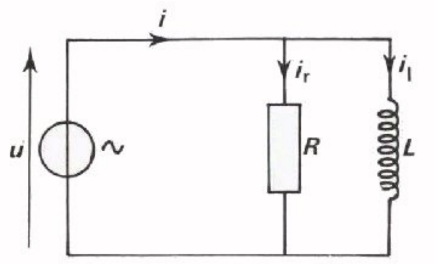
Op ieder moment geldt dat het toegevoerde vermogen het produkt is van de spanning en de stroom op dat moment.

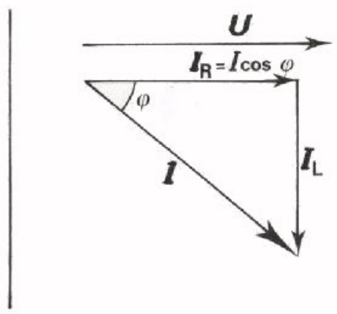
Door nu punt voor punt de beide bovenste grafieken te vermenigvuldigen, ontstaat de onderste grafiek voor het verloop van het momentele vermogen bij een spoel gedurende een periode.
Ga dit zorgvuldig na.

We zien dat het vermogen elke kwart periode een ander teken heeft. Er wordt evenveel energie toegevoerd tijdens de ene kwart periode, als dat er over de volgende kwart periode wordt afgegeven.
Over een hele periode is de toegevoerde energie bij een spoel precies gelijk aan nul, zodat ook het gemiddelde vermogen dan nul is:

$$\boxed{P_{l(gem)} = 0}$$

VERMOGEN BIJ EEN WISSELSPANNING OP EEN PARALLELSCHAKELING VAN *R* EN *L*





Hoe groot is het vermogen dat aan een parallelschakeling van een *R* en een *L* wordt toegevoerd?

We hebben gezien dat een spoel gemiddeld geen vermogen opneemt. In nevenstaande schakeling wordt dus alleen vermogen toegevoerd aan de weerstand.
Dit vermogen is gelijk aan

$$P = U_{eff} \cdot I_{R(eff)}$$

Uit het vectordiagram blijkt

$$\frac{I_{Rt}}{I_t} = \cos\varphi$$

of $I_{Rt} = I_t \cdot \cos\varphi$

Dan is ook

$$I_{R(eff)} = I_{eff} \cdot \cos\varphi$$

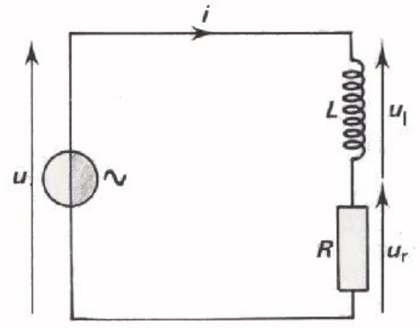
Voor het vermogen kunnen we dus schrijven

$$P = U_{eff} \cdot (I_{Reff}) = U_{eff} \cdot (I_{eff} \cdot \cos\varphi)$$

$$\boxed{P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi}$$

Het vermogen, dat aan een parallelschakeling van een *R* en een *L* wordt toegevoerd, is dus gelijk aan het produkt van de effectieve waarden van de spanning en de totale stroom in de schakeling en de cosinus van de fasehoek tussen deze twee.

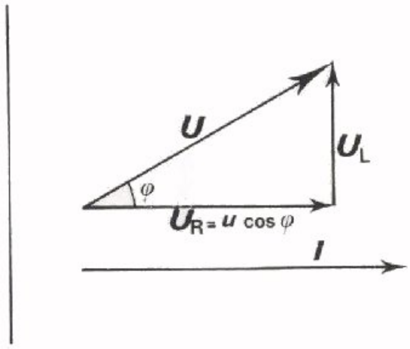
VERMOGEN BIJ EEN WISSELSTROOM DOOR EEN SERIESCHAKELING VAN R EN L



Als u het vorig blad goed hebt begrepen, dan is het volgende zeer eenvoudig. De redenering is n.l. soortgelijk.

Ook in deze schakeling wordt alleen aan de weerstand vermogen toegevoerd; het door de spoel opgenomen vermogen is immers gemiddeld nul. De schakeling neemt dus een vermogen op

$$P = I_{eff} \cdot U_{R(eff)}$$



Uit het bijbehorende vectordiagram volgt onmiddellijk

$$\frac{U_{Rt}}{U_t} = \cos \varphi$$

of $\quad U_{Rt} = U_t \cdot \cos \varphi$

Dan is ook

$$U_{R(eff)} = U_{eff} \cdot \cos \varphi$$

Het vermogen is dus

$$P = I_{eff} \cdot (U_{R(eff)}) = I_{eff} \cdot (U_{eff} \cdot \cos \quad)$$

$$\boxed{P = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \cos \varphi}$$

We krijgen dus voor het vermogen bij deze serieschakeling precies dezelfde formule als bij de parallelschakeling van R en L. Voor elke wisselstroomschakeling - hoe ingewikkeld ook - geldt steeds, dat:

> het opgenomen vermogen gelijk is aan het produkt van de effectieve waarden van de spanning op en de stroom door die schakeling, vermenigvuldigd met de cosinus van de fasehoek tussen deze stroom en spanning.

ENIGE OPMERKINGEN

- De formule voor het opgenomen vermogen

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi$$

gaat ook op voor een weerstand. Dan zijn stroom en spanning immers in fase. Dit betekent $\varphi = 0^0$, dus $\cos\varphi = 1$. We vinden dan de formule voor het in een weerstand ontwikkelde wisselstroomvermogen terug

$$P_R = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

De formule gaat ook op voor een condensator. Bij een condensator is immers $\varphi = 90^0$, dus $\cos\varphi = 0$. We vinden dan

$$P_C = 0.$$

De formule gaat tenslotte ook op voor een spoel. Bij een spoel is immers ook $\varphi = 90^0$, zodat $\cos\varphi = 0$. Dus ook geldt

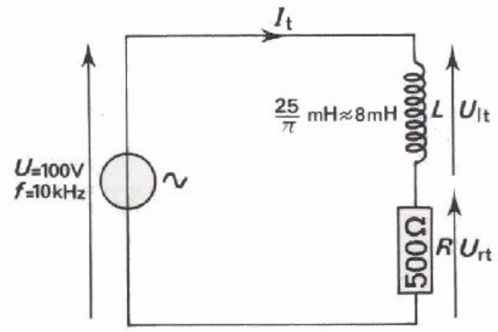
$$P_L = 0.$$

- Als aan een schakeling wisselspanning en -stroom worden toegevoerd is het voor het bepalen van het toegevoerde wisselstroomvermogen niet voldoende om U_{eff} en I_{eff} te meten. Men zal ook de hoek van faseverschuiving φ moeten meten om het vermogen te kunnen berekenen.

- De beschouwingen omtrent het wisselstroomvermogen in deze les hebben uitsluitend betrekking op *sinusvormige* stromen en spanningen met *één* frequentie. Zij gelden niet voor niet-sinusvormige wisselstromen en -spanningen. Zij gelden ook niet als er sprake is van wisselstromen en -spanningen met verschillende frequenties, die tegelijkertijd in een schakeling optreden.

OEFENING

We willen het aan onderstaande schakeling toegevoerde wisselstroomvermogen berekenen.



We moeten dan eerst volledig inzicht in de schakeling krijgen. Daartoe gaan we het vectordiagram tekenen.

- De reactantie van de L is

X_L = [ ]

- De spanning U_{rt} is

$R \cdot I_t$ = [$\cdot I_t$]

- De spanning over de spoel is $U_{lt} = X_L \cdot I_t$ = [$\cdot I_t$]

- De verhouding van U_{rt} en U_{lt} is $\frac{U_{rt}}{U_{lt}}$ = [————]

- Teken nu op schaal hiernaast het vectordiagram voor deze schakeling.
  Geef de hoek van faseverschuiving tussen u en i aan.

- De hoek φ = [ ]

  Dus: $\cos \varphi$ = [ ]

- De impedantie $Z = \sqrt{\quad + \quad} = \sqrt{\quad} \approx$ [ ]

- Nu kunnen we I_t berekenen uit

$$I_t = \frac{U_t}{Z} = \frac{100}{707}$$ [A]

- Het aan de schakeling toegevoerde wisselstroomvermogen is dan

$P = \frac{1}{2}\, U_t \cdot I_t \cdot \cos \varphi = \frac{1}{2}$, ———— [W]

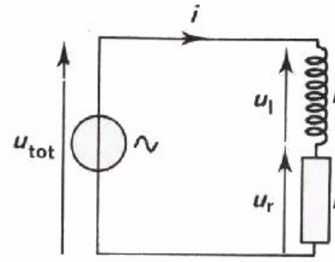
- Men kan ook stellen dat het toegevoerde wisselstroomvermogen gelijk is aan

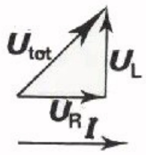
$P = \frac{1}{2}\, I_t^2 \cdot R = \frac{1}{2} \cdot$ = [W]

SAMENVATTING

- In een serieschakeling van L en R geldt dat de totale impedantie wordt gevonden met de formule

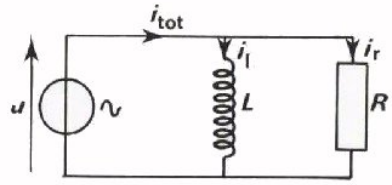
$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

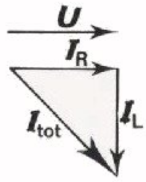




- Bij de parallelschakeling van R en L geldt

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{X_L^2} + \frac{1}{R^2}}$$

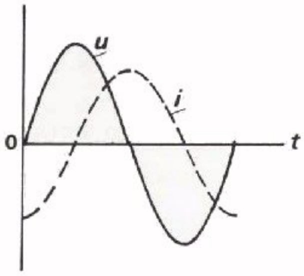


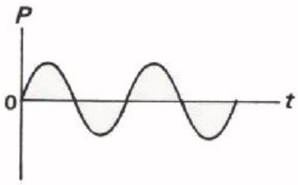


- In een spoel L wordt gemiddeld *geen* vermogen ontwikkeld

$$P_{l(gem)} = 0$$

Dit wordt veroorzaakt doordat stroom en spanning bij een spoel 90^0 in fase zijn verschoven. Per periode wordt evenveel energie aan de spoel geleverd, als dat er van de spoel wordt teruggevoerd.





- Bij een serie- zowel als een parallelschakeling van een L en R wordt een vermogen toegevoerd dat gelijk is aan

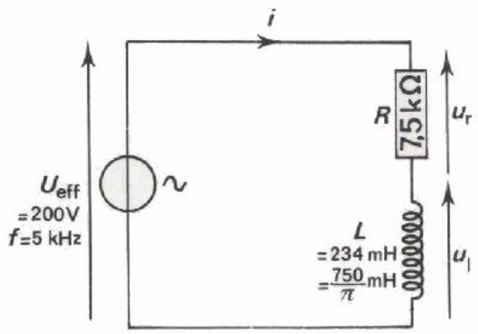
$$\boxed{P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi}$$

Hierin stelt φ de hoek van faseverschuiving voor tussen de aan de totale schakeling toegevoerde spanning en stroom. Deze formule geldt alleen bij sinusvormige stromen en spanningen met een en dezelfde frequentie.

NAAM:

KLAS:

OEFENING

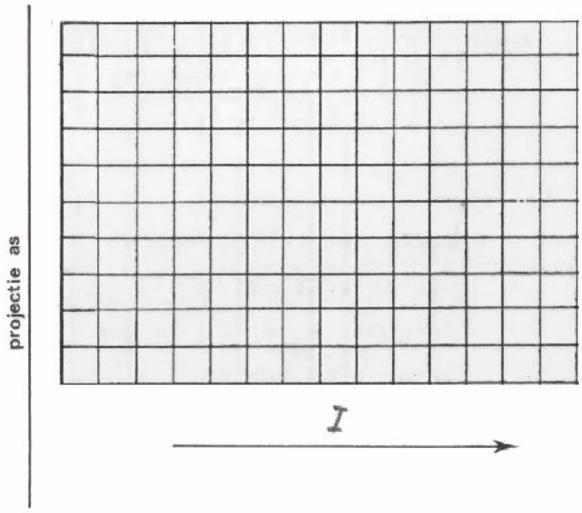


Gevraagd te berekenen hoe groot het wisselstroomvermogen is dat aan deze schakeling wordt toegevoerd.

- Bereken de reactantie X_L van de spoel.

X_L =

- Teken hiernaast op schaal het vectordiagram van deze schakeling.



- Bereken $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

= kΩ

- Bepaal door opmeting in het vectordiagram

cos φ =

- Bereken $I_{eff} = \frac{U_{eff}}{Z} = \frac{\quad}{\quad}$ A of I_{eff} = mA

- Bereken tenslotte het toegevoerde vermogen

$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi =$

≈ W

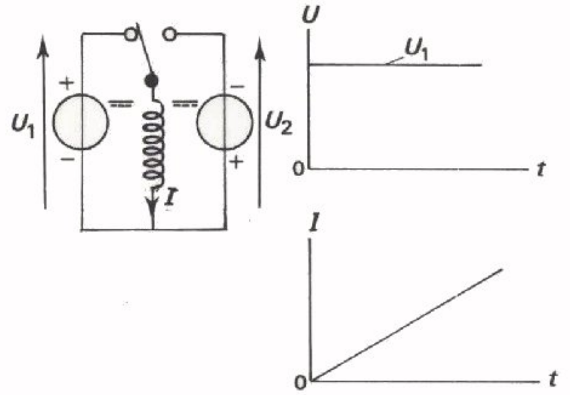
of ook $P = I_{eff}^2 \cdot R =$

≈ W

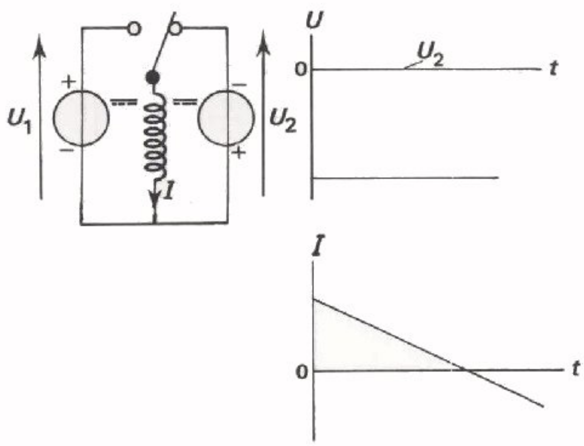
A 50 HET ONTSTAAN EN WEGVALLEN VAN STROOM IN EEN SPOEL

DE IDEALE SPOEL

We herhalen eerst in het kort het in- en uitschakelen van de stroom door een spoel zonder weerstand, een "ideale" spoel.



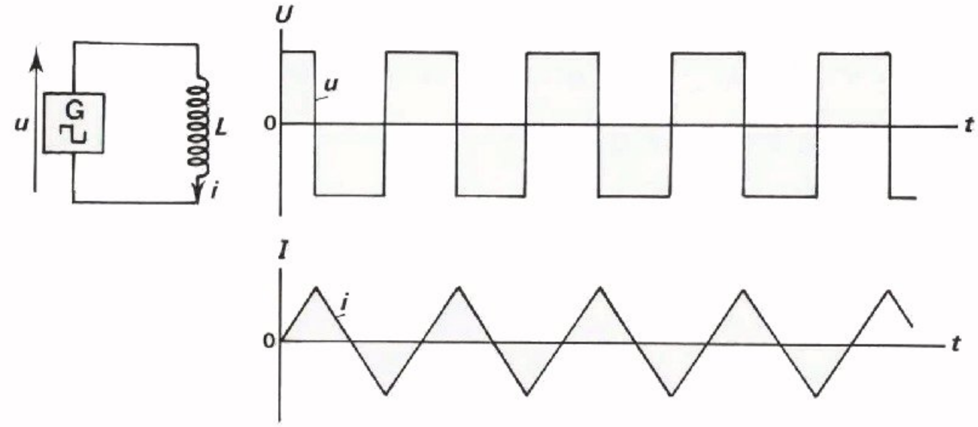
Sluit men een gelijkspanning U_1 op een ideale spoel aan, dan neemt de stroom I lineair toe. Er is n.l. tijd nodig om de energie toe te voeren, die wordt gebruikt voor het magnetische veld, dat I veroorzaakt.



Schakelt men de spoel vervolgens snel over op een tegen de reeds lopende stroom in gerichte spanning U_2, dan neemt de stroom lineair af tot nul. Daarna gaat hij in tegenovergestelde richting weer aangroeien.

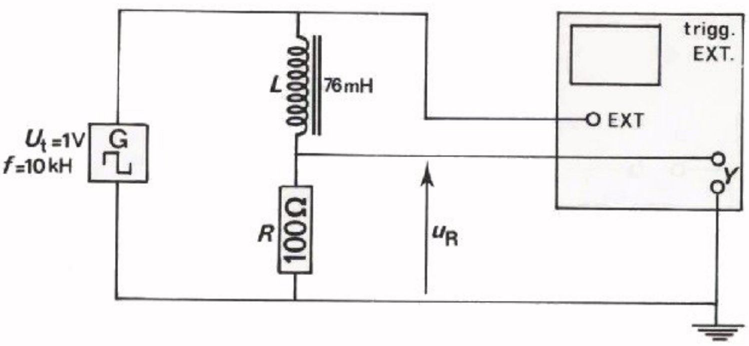
Zou men de schakelaar steeds heen en weer blijven schakelen, dan zou de stroom door de spoel al maar lineair aangroeien, lineair afnemen, andersom lineair aangroeien, andersom lineair afnemen, enz.

Hetzelfde vindt plaats als men een blokspanning op de spoel aansluit.



Dit gaan we nog een keer bekijken in de volgende opdracht.

OPDRACHT: HET ONTSTAAN EN WEGVALLEN VAN STROOM IN EEN IDEALE SPOEL



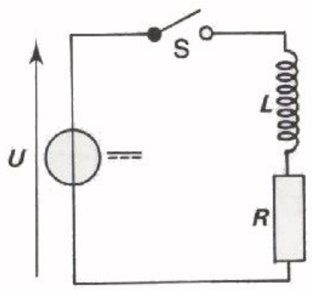
- Bouw bovenstaande schakeling.
- Stel de oscilloscoop in op:

  TRIGG: "EXT"

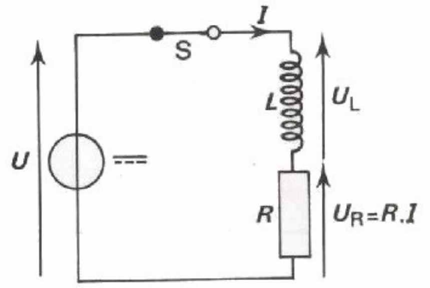
  0-AC-DC: "DC".
- Voer een blokspanning toe van U_t = 1 V en f = 10 kHz.
- Maak 5 à 6 perioden van $u_r = R.i$ zichtbaar op het scherm.
- U ziet dat de stroom telkens lineair verandert.
- Breek de schakeling nog *niet* af.

HET ONTSTAAN VAN STROOM IN DE SERIESCHAKELING VAN EEN SPOEL EN EEN WEERSTAND

Wat gebeurt er, als men een gelijkspanning aansluit op de serieschakeling van een spoel en een weerstand.



Onmiddellijk na het sluiten van S loopt er nog geen stroom, omdat het magnetische veld van de spoel nog opgebouwd moet worden. Ook door R loopt dus nog geen stroom, zodat over R geen spanning staat en de gehele toegevoerde spanning U over de spoel staat.

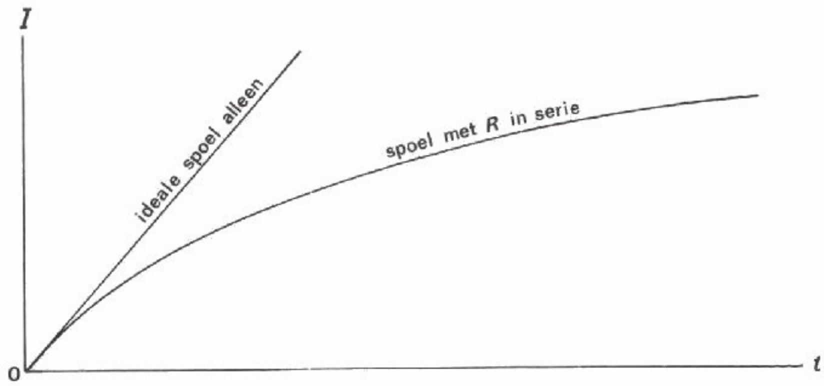


Daarna gaat de stroom door de spoel aangroeien. Deze stroom loopt nu echter ook door de R en zal een eveneens aangroeiende spanning $u_r = R.i$ veroorzaken.

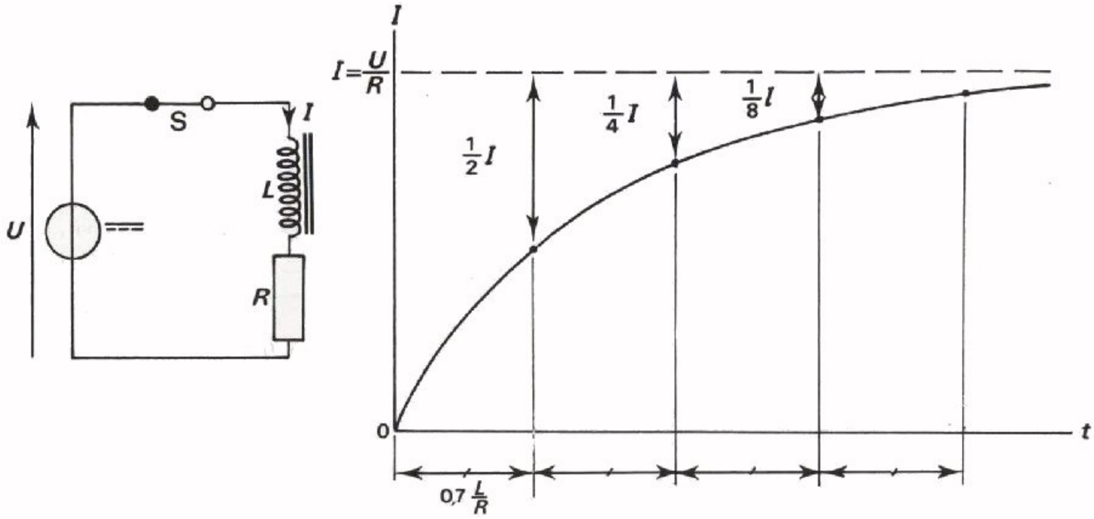
Als de toegevoerde spanning U constant blijft en u_r aangroeit, *zal de spanning* $u_L = U - U_R$ *over de spoel gaan afnemen.*

Merk op dat dit anders is dan in het geval van de hiervoor besproken ideale spoel alléén. Daarbij bleef tijdens het lineaire aangroeien van i de spanning over de spoel constant.

Omdat bij de spoel met serieweerstand de spanning u_L over de spoel tijdens het aangroeien van i afneemt, zal deze i *minder dan lineair* gaan aangroeien, zoals hieronder is geschetst.



Bij een ideale spoel alléén wil i lineair toenemen naar een oneindig grote waarde. Bij een spoel met serieweerstand neemt de i net zo lang toe, tot $u_R = R.i$ gelijk is geworden aan de toegevoerde totaalspanning U.
Dan staat er over de spoel helemaal geen spanning meer,
($U_L = U - U_R = U - U = 0$) en neemt de stroom niet meer toe.
De stroom groeit dus aan tot de waarde $I = \frac{U}{R}$ en verandert daarna niet meer.



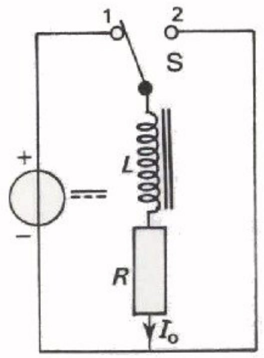
Het is gebleken dat het aangroeien van de stroom in een spoel met serieweerstand net zo verloopt als het aangroeien van de spanning over een condensator die via een serieweerstand wordt geladen.

Ook nu duurt het telkens even lang om "het bedrag dat de stroomsterkte nog zal stijgen" te halveren.

Opmerking

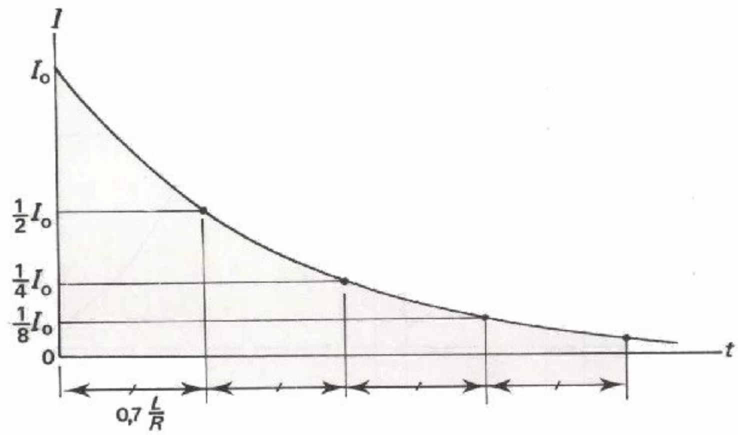
In het geval van een spoel met serieweerstand is dit moeilijk met een horloge na te gaan, zoals we dit bij een C en een R hebben gedaan. Dit komt omdat de te meten tijd in praktisch te verwerkelijken gevallen altijd veel kleiner is dan één seconde.

HET WEGVALLEN VAN STROOM IN EEN SPOEL MET SERIEWEERSTAND



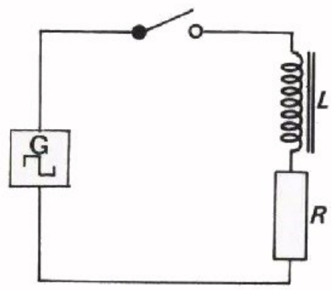
Sluiten we een stroomvoerende serieschakeling van een spoel en een weerstand opeens kort (omschakelen van S), dan blijft de eenmaal lopende stroom I nog even door lopen en neemt daarbij af tot nul.

Het afnemen van de stroom in de spoel verloopt dan net zo als het afnemen van de spanning over een condensator,die zich via een R ontlaadt. Dit is hieronder getekend.

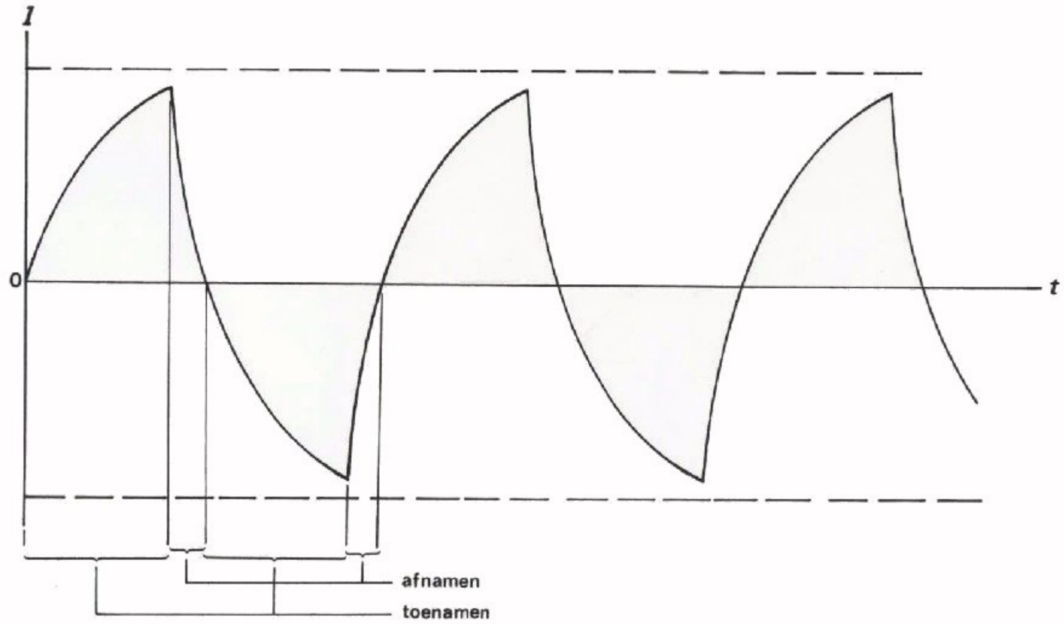


Ook nu neemt de afnemende grootheid (de stroom in dit geval) telkens in dezelfde tijd af tot op de helft van de voorgaande waarde.

HET AANGROEIEN EN AFNEMEN VAN DE STROOM IN DE SERIESCHAKELING VAN EEN L EN EEN R

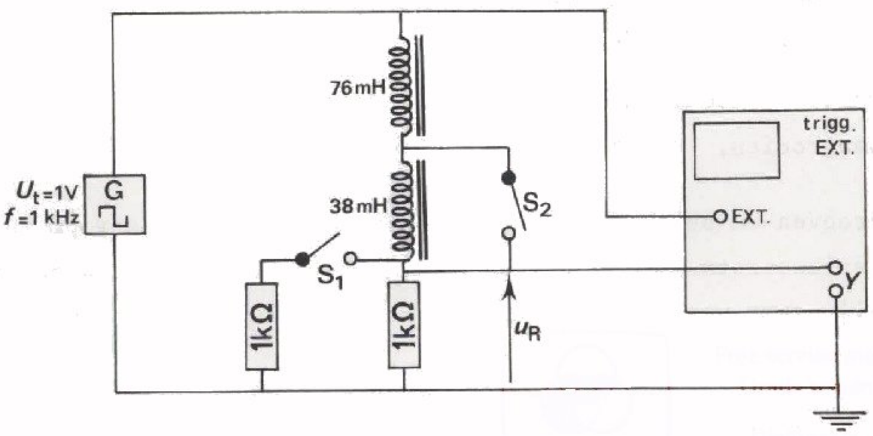


Als we een blokspanning op de serieschakeling van een L en een R aansluiten, dan neemt de stroom beurtelings toe en af. We krijgen dan een combinatie van de gevallen van de bladen A50.4 en A50.5, die hieronder is geschetst.



In een volgende opdracht gaan we dit bekijken.

OPDRACHT: HET AANGROEIEN EN AFNEMEN VAN STROOM IN EEN SPOEL MET SERIEWEERSTAND



- Vervang in de meetopstelling van blz. A50.2 de spoel van 76 mH door een serieschakeling van deze spoel en een spoel van 38 mH.

- Vervang de weerstand van 100 Ω door een van 1 kΩ. Stel de frequentie van de blokspanning in op 1 kHz. S_1 en S_2 zijn open.

- Maak ca. 2 perioden van de spanning $u_r = i.R$ zichtbaar op het scherm. De stroom verloopt op dezelfde wijze. U ziet het op A50.6 geschetste verloop.

- Sluit S_1. Hierdoor wordt de waarde van de serieweerstand gehalveerd. U ziet dat de stroomafname in de spoel door verkleinen van de *R*

  | sneller / langzamer | geschiedt.

- Open S_1 en sluit S_2. Stel de frequentie van de blokspanning in op 2 kHz. Maak ca. 2 perioden van u_r zichtbaar op het scherm.

- Maak de zelfinductie van de spoel groter door S_2 te openen. U ziet dat de stroomafname in de spoel door vergroten van de *L*

  | sneller / langzamer | geschiedt.

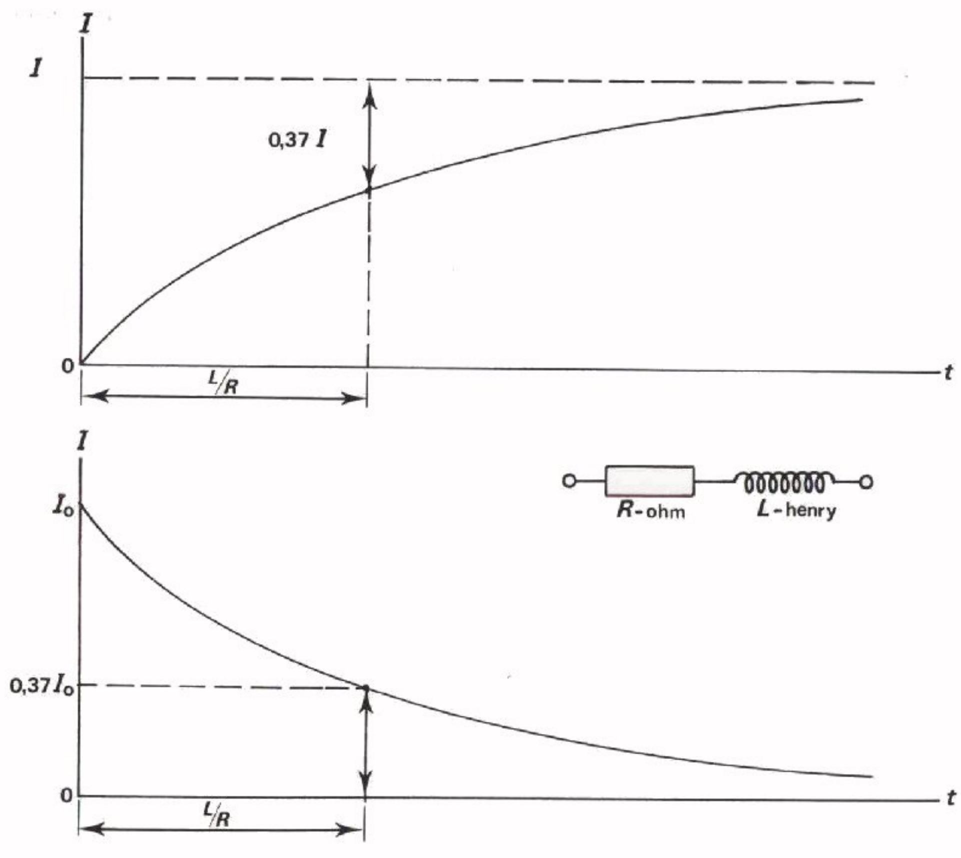
CONCLUSIE

In de voorgaande opdracht hebt u gezien dat het af- en toenemen van stroom in een spoel met serieweerstand langzamer geschiedt:

- naarmate de L groter is,
- naarmate de R kleiner is.

De tijd, nodig om de stroom een bepaald percentage te laten afnemen of aangroeien, hangt blijkbaar af van *het quotiënt* $\frac{L}{R}$.

Proeven en berekeningen hebben aangetoond dat de stroom in een spoel met serieweerstand in $\frac{L}{R}$ seconden afneemt tot 37% van zijn beginwaarde.
Hij neemt verder in $\frac{L}{R}$ seconden toe tot (100 - 37)% van zijn eindwaarde.
De "$\frac{L}{R}$-tijd" van een spoel met weerstand vertoont veel overeenkomst met de "RC-tijd" van een condensator met weerstand.



DE PRAKTISCHE SPOEL

Tot nu toe hebben we behandeld:

- Een *ideale spoel* zonder serieweerstand. Toevoeren van gelijkspanning doet hier de stroom *lineair* toenemen.
- Een *ideale spoel* met *aparte serieweerstand*. Toevoeren van gelijkspanning doet hier de stroom *minder dan lineair* toenemen, omdat bij het aangroeien van de stroom er steeds meer spanningsverlies $R.I$ over de R optreedt. Tenslotte bereikt de stroom de maximale waarde $\frac{U}{R}$, waarbij alle toegevoerde spanning over de R staat.

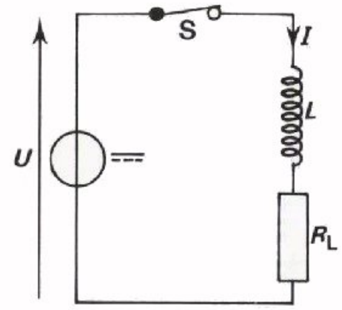
In de praktijk heeft men echter nooit met ideale spoelen te doen. Elke spoel heeft praktisch wel enige inwendige ohmse weerstand R_L (koperdraadweerstand). Sluit men een gelijkspanning aan op een praktische spoel, dan gaat de stroom dus "minder dan lineair" toenemen en bereikt uiteindelijk de waarde $I = \frac{U}{R_L}$.

Zover komt het in de regel niet omdat de spoel b.v. voor het zover is al veel te heet is geworden en daardoor defect raakt.

Bij onze proeven met z.g. *ideale spoelen* hebben de gebruikte praktische spoelen zich vrijwel ideaal gedragen. We hebben telkens gedurende zó korte tijd eenzelfde gelijkspanning toegevoerd, dat de stroom geen kans kreeg om tot een zó grote waarde aan te groeien dat het spanningsverlies $R_L.I$ merkbaar was.

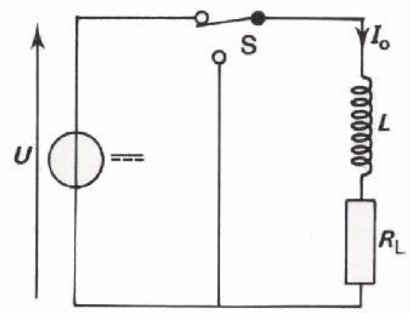
HET PLOTSELING LATEN WEGVALLEN VAN DE STROOM IN EEN SPOEL

Tot slot zullen we nog een voor de praktijk belangrijke opmerking maken over het gevaar van een stroomvoerende spoel plotseling "open" te schakelen.

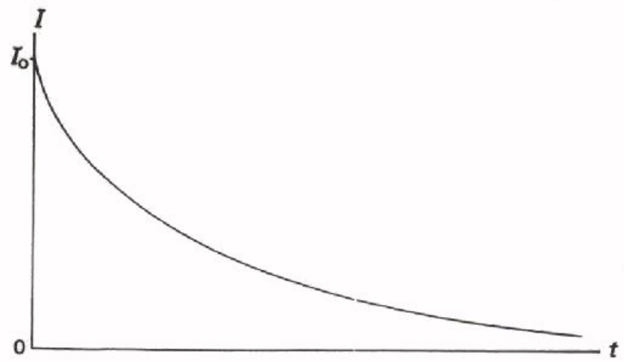


Stel dat we aan een spoel een stroom $I = \frac{U}{R_L}$ toevoeren.
Als we nu de schakelaar S plotseling openen, zal de spoelstroom in zéér korte tijd afnemen van I tot nul. Hierdoor valt de magnetische flux van de spoel in zeer korte tijd weg en wordt er een zeer grote zelfinductiespanning in de spoel geïnduceerd.

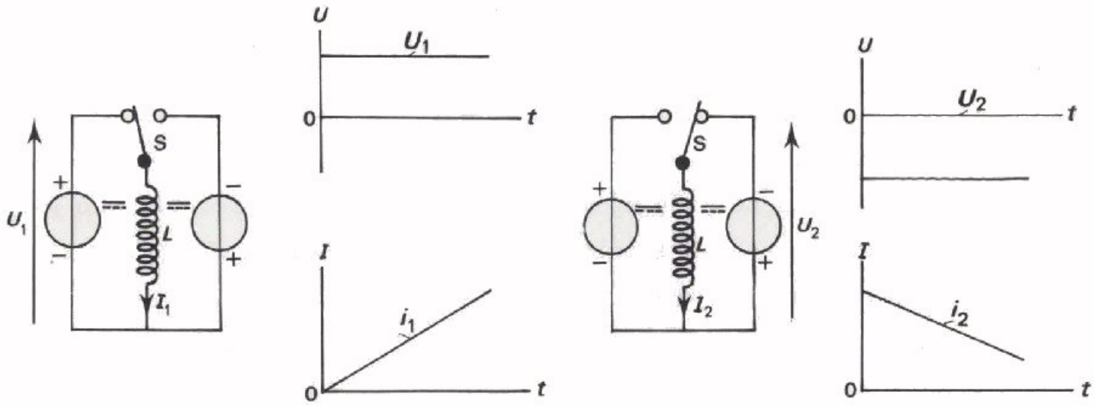
Deze grote inductiespanning, die zich over de windingen verdeelt, zal doorslag van de spoelisolatie tot gevolg kunnen hebben, waardoor de spoel defect raakt. Bovendien zal vlak na het schakelen een grote spanning tussen de schakelcontacten ontstaan, die vonkoverslag tot gevolg heeft. Hierdoor zullen de contacten van de schakelaar al gauw inbranden. In de praktijk neemt men dan ook altijd maatregelen om te vermijden dat men bij het uitschakelen van de spoelstroom de spoel in korte tijd "open" schakelt.



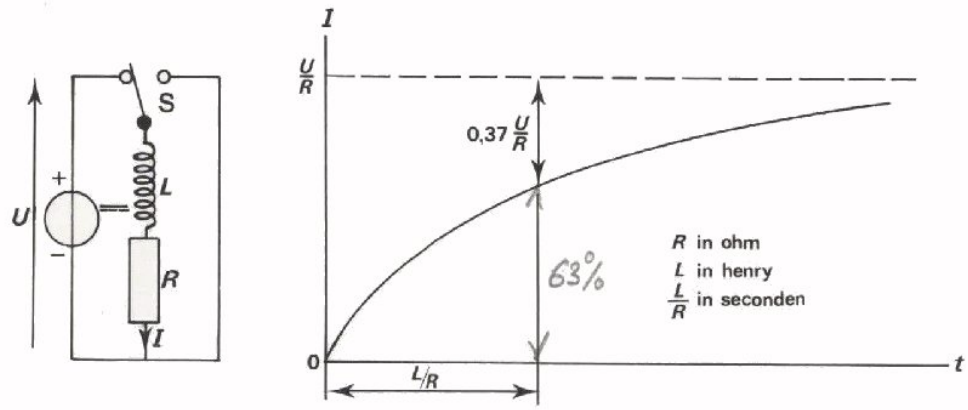
Dit gebeurt b.v. door de spoel van de spanningsbron om te schakelen op een kortsluiting die het spoelcircuit gesloten houdt. Daardoor zal de stroom I dan veel minder snel wegvallen en de zelfinductiespanning niet zo groot worden.



- Sluit men een *ideale spoel* (zonder ohmse weerstand) aan op een gelijkspanning, dan neemt de stroom *lineair* toe of af.

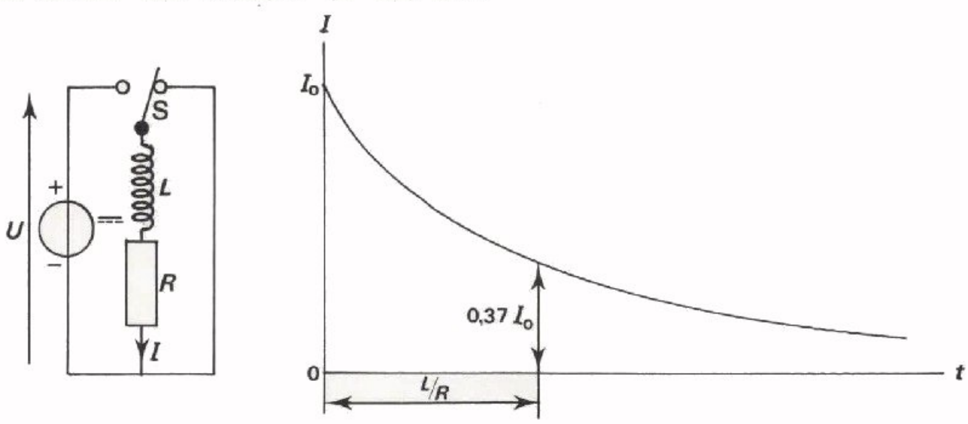


- Sluit men een *spoel met serieweerstand* R aan op **een gelijkspanning U,** dan neemt de stroom *minder dan lineair* toe om **uiteindelijk een maximale** waarde $\frac{U}{R}$ te bereiken.



In de $\frac{L}{R}$-tijd neemt de stroom toe tot (1 - 0,37) maal de uiteindelijk te bereiken maximum waarde.

- Sluit men de *stroomvoerende spoel met serieweerstand* kort, dan neemt de stroom *minder dan lineair* af tot nul.



In de $\frac{L}{R}$-tijd neemt de stroom af tot 0,37 maal zijn beginwaarde.

- Een praktische spoel heeft altijd enige inwendige ohmse weerstand R_L, namelijk de koperdraadweerstand van zijn windingen. Daarom zal bij aansluiting van gelijkspanning U op een praktische spoel de stroom *minder dan lineair* willen toenemen naar de maximaal te bereiken waarde $\frac{U}{R_L}$.

  Dat de stroom minder dan lineair naar een eindige waarde gaat komt omdat over de R_L een aangroeiende spanning $R_L.I$ komt te staan. Staat de spanning zo kort op de spoel dat $R_L.I$ nog niet tot een goed merkbare waarde is aangegroeid, dan is het net alsof de spoel wel ideaal is en is de stroom praktisch lineair aangegroeid.

- Men mag een stroomvoerende spoel nooit plotseling "open" schakelen, omdat de daardoor optredende zeer grote zelfinductiespanning de spoelisolatie defect kan maken.

  Bovendien zal een sterke vonk tussen de schakelcontacten overslaan, met op den duur inbranden van deze contacten als gevolg.

NAAM: ____________ **KLAS:** ____________

OEFENINGEN

1. Als men op een spoel een gelijkspanning van 20 V aansluit, groeit de stroom in 5 ms *lineair* aan tot 4 A.

   Hoe groot is de L van de spoel? L = ____________

2. Als men op de spoel uit vraag 1 een spanning van 40 V aansluit, in hoeveel tijd groeit de stroom dan aan tot 4 A?

   t = ____________

3. Als men op de spoel uit vraag 1 een spanning van 10 V aansluit, in hoeveel tijd groeit de stroom dan aan tot 8 A?

   t = ____________

4. Als men op een spoel met een ohmse weerstand van 100 Ω een gelijkspanning aansluit van 10 V, groeit de stroom in 2 ms aan tot 50 mA.

   Teken hieronder de grafiek van het stroomverloop gedurende de eerste 8 ms.

A50.14

A 51 HERHALING 5

Les A44 bestond uit een test. Sindsdien hebben we enige onderwerpen uit het magnetisme behandeld en we hebben het gehad over de transformator en de spoel. In deze les gaan we dit nog eens snel herhalen. In les A52 volgt dan een test.

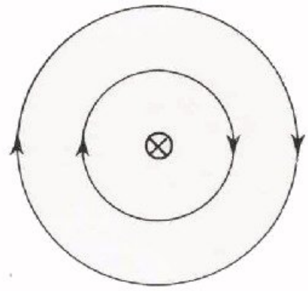
Enkele tips:

- Werk deze herhalingsles grondig door.
- Bestudeer de samenvattingen van de lessen A45 t/m A50 nog eens goed.
- Ga na in welke oefeningen u fouten maakte en probeer vooral te achterhalen waarom u die maakte.
- Als u iets nog niet duidelijk is, vraag het dan aan uw leraar.

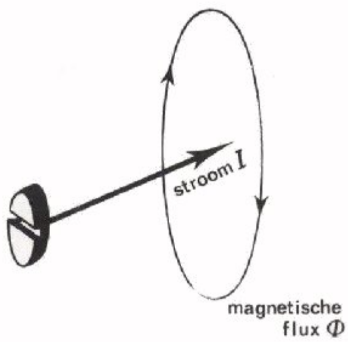
MAGNETISME

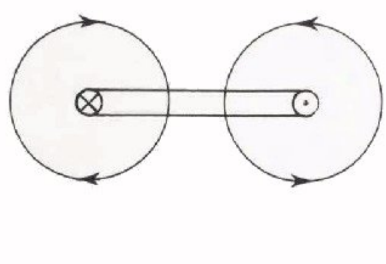
Kort herhalen we de grondbeginselen van het magnetisme.

- Een *(permanente) magneet* is een stuk staal of ijzerverbinding, dat de eigenschap heeft stukjes ijzer aan te trekken.
- Hangt men een staafmagneet in het midden op, dan wijst zijn ene kant (de z.g. *noordpool*) ongeveer naar het noorden en de andere kant (de z.g. *zuidpool*) ongeveer naar het zuiden.
- Een *kompas* heeft een klein draaibaar opgesteld staafmagneetje, dat dienst doet om de noord-zuid richting te bepalen.
- Gelijknamige polen stoten elkaar af en ongelijknamige trekken elkaar aan.
- Een geleider waar stroom door gaat heeft altijd een magnetisch veld om zich heen. Dit veld vormt als het ware een "ring" om de geleider. We zeggen dat het veld met de geleider is *gekoppeld*.



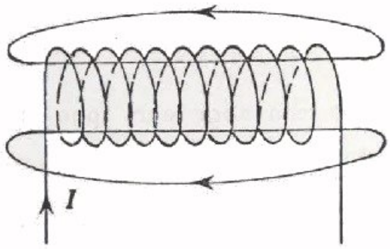
- Het magnetisch veld oefent een krachtsinvloed uit, die men kan constateren door een kompasnaaldje in het veld te brengen. De krachtsinvloed noemen we de *magnetische flux* Φ. In tekeningen geven we deze aan door middel van *fluxlijnen*. De pijlpuntjes op deze fluxlijnen geven de richting aan, waarin de noordpool van een kompasnaaldje zal wijzen.
- De richtingen van de elektrische stroom en het bijbehorend magnetische veld volgen uit de *rechtse schroefregel*.





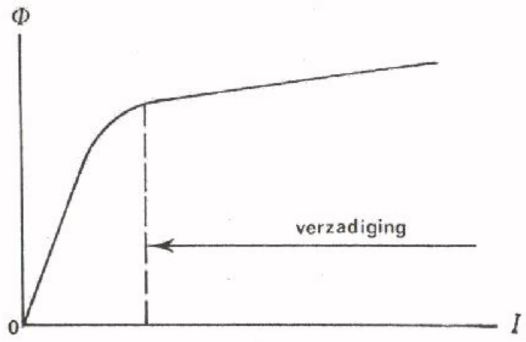
- Ook met een stroomvoerende lus of *winding* is een magnetisch veld gekoppeld.

Een aantal windingen vormt samen een spoel, waarmee ook weer een magnetisch veld is gekoppeld



- Het magnetisch veld van een spoel kan men aanzienlijk versterken door er een *ijzeren kern* in aan te brengen.

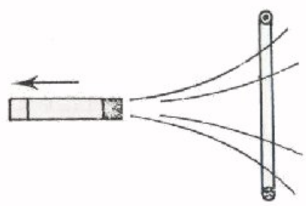
- Laat men de stroom *i* door een spoel met ijzerkern toenemen, dan neemt de flux Φ aanvankelijk ongeveer evenredig toe met de stroom, omdat er al maar meer elementair-magneetjes gericht worden.
  Bij grotere stromen loopt het ijzer *in verzadiging*.
  Alle elementair-magneetjes zijn dan gericht en Φ neemt nauwelijks meer toe.



- Voor *magneetpolen* geldt de regel, dat ongelijknamige polen elkaar aantrekken en gelijknamige elkaar afstoten.
  Voor *magnetische velden* geldt, dat zij altijd zullen proberen samen te vallen.

- Gaat er door een geleider een *wisselstroom*, dan is er met die geleider ook een *wisselend* magneetveld gekoppeld.

- Ook het omgekeerde is waar.
  Als een winding gekoppeld wordt met een wisselend magnetisch veld, dan wordt in de winding een wisselspanning opgewekt.
  Deze spanning veroorzaakt op zijn beurt weer een wisselstroom in de gesloten winding.
  De opgewekte spanning heet *inductiespanning*.



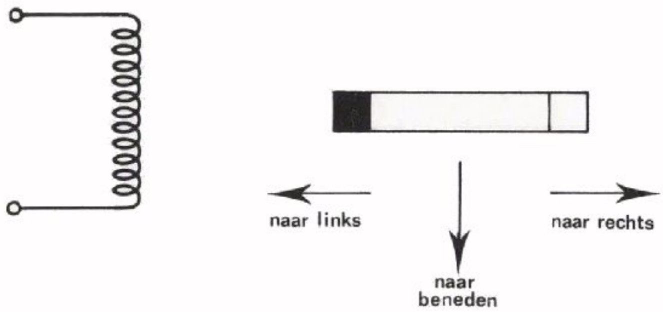
- Koppelt men een spoel met een wisselend magnetisch veld, dan wordt er in elke winding een inductiespanning U_{ind} opgewekt. Voor de gehele spoel met n windingen staan de opgewekte inductiespanningen in serie, zodat de totale spanning nu n x zo groot wordt.

TEST UZELF

1. Als men door een spoel met ijzeren kern een steeds grotere stroom voert, dan loopt het ijzer in verzadiging. Dit wil zeggen, dat:

het ijzer zo heet wordt dat het gedemagnetiseerd wordt.	O
de magnetische flux nog maar weinig toeneemt.	O
de wervelstroomverliezen kleiner worden ten opzichte van de koperverliezen.	O
de spoel zich gaat gedragen als een zwakke permanente magneet.	O

2.



In de spoel wordt een inductiespanning opgewekt als de permanente magneet:

naar links wordt bewogen.	O
naar beneden wordt bewogen.	O
naar rechts wordt bewogen.	O
in een richting loodrecht op het papier wordt bewogen.	O

DE CAPACITEIT VAN EEN CONDENSATOR EN DE ZELFINDUCTIE VAN EEN SPOEL

De capaciteit C van een condensator is de verhouding tussen de lading Q op elk van de platen en de bijbehorende spanning U tussen de platen.

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Wordt C door een constante gelijkstroom gedurende t s geladen, dan geldt: de lading Q is gelijk aan $I.t$. We kunnen dan schrijven:

$$\boxed{C = \frac{I.t}{U}}$$

De capaciteit is blijkbaar de verhouding tussen de "toegevoerde stroom maal tijd" en de daardoor ontstane spanning.

De zelfinductie van een spoel:

$$\boxed{L = \frac{U.t}{I}}$$

De zelfinductie is de verhouding tussen de "toegevoerde spanning maal tijd" en de daardoor ontstane stroom.

Als eenheid van zelfinductie gebruikt men de "henry", H. Voert men aan een spoel gedurende 1 seconde een spanning toe van 1 V en is de stroom daardoor 1 A geworden, dan heeft de spoel een zelfinductie L van 1 H.

TEST UZELF

Aan een ideale spoel voert men gedurende 100 µs een spanning toe van 100 V. De stroom groeit dan aan van 0 tot 10 mA.

De zelfinductie van deze spoel is: L = [ ]

DE REACTANTIE

Als we een sinusvormige spanning op een spoel aansluiten, dan gaat er een sinusvormige stroom lopen. De verhouding $\frac{U}{I}$ is de wisselstroomweerstand.

De wisselstroomweerstand van een spoel noemt men de reactantie . Deze geeft men aan met X_L.

De reactantie X_L blijkt gelijk te zijn aan

$$\boxed{X_L = 2\pi fL = \omega L}$$

X_L: reactantie, Ω
f : frequentie, Hz
L : zelfinductie, H.

Ook de wisselstroomweerstand van een condensator noemt men reactantie
Deze duidt men aan met X_C.

De reactantie van een condensator

$$\boxed{X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}}$$

X_C: reactantie, Ω
f : frequentie, Hz
C : capaciteit, F.

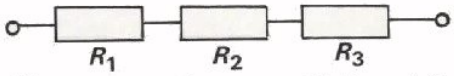
TEST UZELF

Bij welke frequentie zijn de reactanties van een spoel van 1 mH en een condensator van 0,1 μF aan elkaar gelijk?

f = [   ]

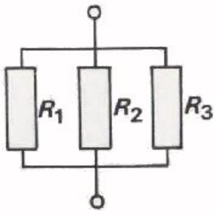
SERIE- EN PARALLELSCHAKELING VAN SPOELEN

- Bij weerstanden in serie geldt voor de vervangingsweerstand



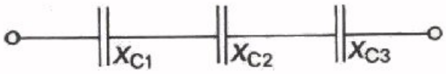
$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + ---$$

Bij weerstanden parallel geldt voor de vervangingsweerstand



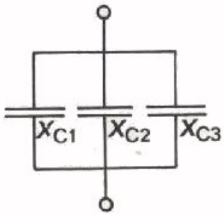
$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + ---$$

- Bij condensatoren in serie geldt voor de vervangings*reactantie*



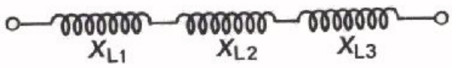
$$X_{Cs} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + ---$$

Bij condensatoren parallel geldt voor de vervangings*reactantie*



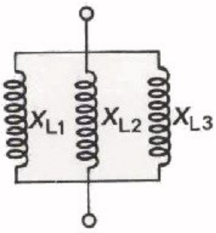
$$\frac{1}{X_{Cp}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} + ---$$

- Bij spoelen in serie geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij condensatoren.



$$X_{Ls} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + ---$$

Bij spoelen parallel geldt voor de vervangings*reactantie* hetzelfde als bij condensatoren.



$$\frac{1}{X_{Lp}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + ---$$

TEST UZELF

1. Twee weerstanden R_1 = 300 Ω en R_2 = 200 Ω staan parallel. De vervangingsweerstand bedraagt

R_p = ☐

2. Twee condensatoren C_1 = 100 nF en C_2 = 400 nF staan parallel en zijn aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 10 mV - 10 kHz.

De vervangingscapaciteit is C_p = ☐

De vervangingsreactantie van deze condensatoren bedraagt

X_{Cp} = ☐

3. Twee spoelen L_1 = 5 mH en L_2 = 20 mH staan parallel en zijn aangesloten op een sinusvormige wisselspanning van 50 mV - 1 kHz.

De vervangingszelfinductie is L_p = ☐

De vervangingsreactantie van de spoelen bedraagt

X_{Lp} = ☐

VECTORDIAGRAMMEN

Om goed in te zien wat er met wisselspanningen en -stromen in een schakeling aan de hand is, tekent men een *vectordiagram.*

Hierna volgen een aantal voorbeelden van schakelingen met hun vectordiagram. Eerst een belangrijke opmerking.

- Men begint bij een *serie*schakeling altijd met de *stroom*vector te tekenen. De stroom is immers voor alle componenten in een serieschakeling dezelfde.
- Men begint bij een *parallel*schakeling altijd met de *spannings*vector te tekenen. De spanning is immers voor alle componenten in een parallelschakeling dezelfde.
- De volgorde van de "spanningspijlen" in het schema is hetzelfde als die van de "spanningsvectoren" in het vectordiagram.

Realiseer u verder nog eens goed, dat de projectie van een vector op de projectie-as de momentele waarde voorstelt.

De wisselstroomweerstand $\frac{U}{I}$ van een schakeling,die alleen uit L's of C's bestaat, wordt *reactantie* X genoemd.

De reactantie van een spoel wordt aangegeven met: X_L. Die van een condensator met: X_C.

Bestaat de schakeling uit een combinatie van R en L of van R en C, dan heet de wisselstroomweerstand *impedantie* Z.

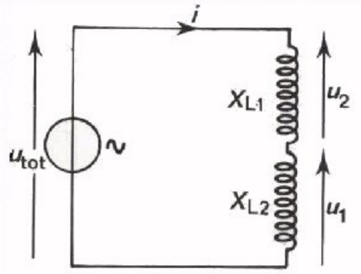
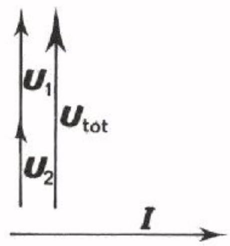
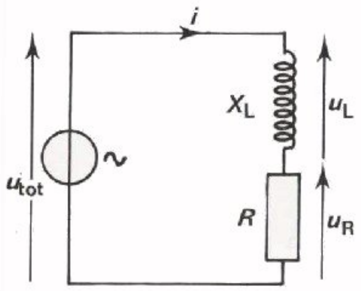
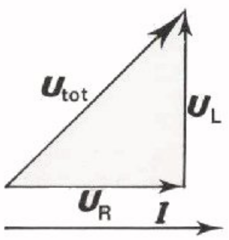
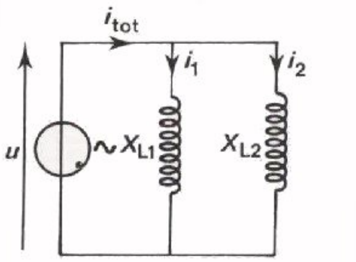
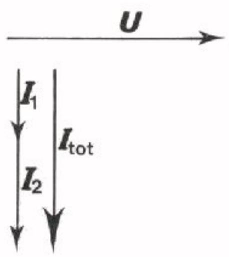
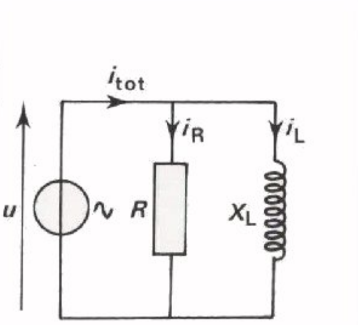
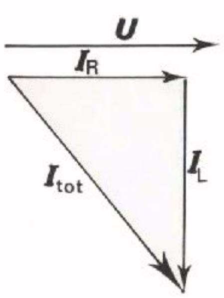
Bestudeer nu aandachtig de volgende schakeling van L's en R's.

U *moet* alles wat op het volgend blad staat geheel *begrijpen.*

Van buiten proberen te leren is zinloos.

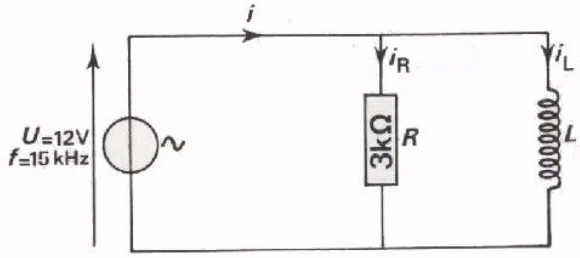
Hebt u het niet geheel door, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.

OVERZICHT VAN ENKELE SCHAKELINGEN

schakeling	vectordiagram	volgorde van tekenen	berekening van de wisselstroom-weerstand
		I U_1 U_2 U_{tot}	$u_{tot} = u_1 + u_2$ $X_{Ls}\cdot i = X_{L1}\cdot i + X_{L2}\cdot i$ $\boxed{X_{Ls} = X_{L1} + X_{L2}} = \frac{u_{tot}}{i}$
		I U_R U_L U_{tot}	$U^2_{tot} = U^2_R + U^2_L$ $(Z_s\cdot I)^2 = (R\cdot I)^2 + (X_L\cdot I)^2$ $Z^2_s = R^2 + X^2_L$ $\boxed{Z_s = \sqrt{R^2 + X^2_L}}$ $\frac{U_{tot}}{I}$
		U I_1 I_2 I_{tot}	$I_{tot} = I_1 + I_2$ $\frac{U}{X_{Lp}} = \frac{U}{X_{L1}} + \frac{U}{X_{L2}}$ $\boxed{\frac{1}{X_{Lp}} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}}} = \frac{I_{tot}}{U}$
		U I_R I_L I_{tot}	$I^2_{tot} = I^2_R + I^2_{XL}$ $\frac{U^2}{Z_p} = \frac{U^2}{R} + \frac{U^2}{X_L}$ $\frac{1}{Z_p^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2_L}$ $\boxed{\frac{1}{Z_p} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2_L}}} = \frac{I_{tot}}{U}$

TEST UZELF

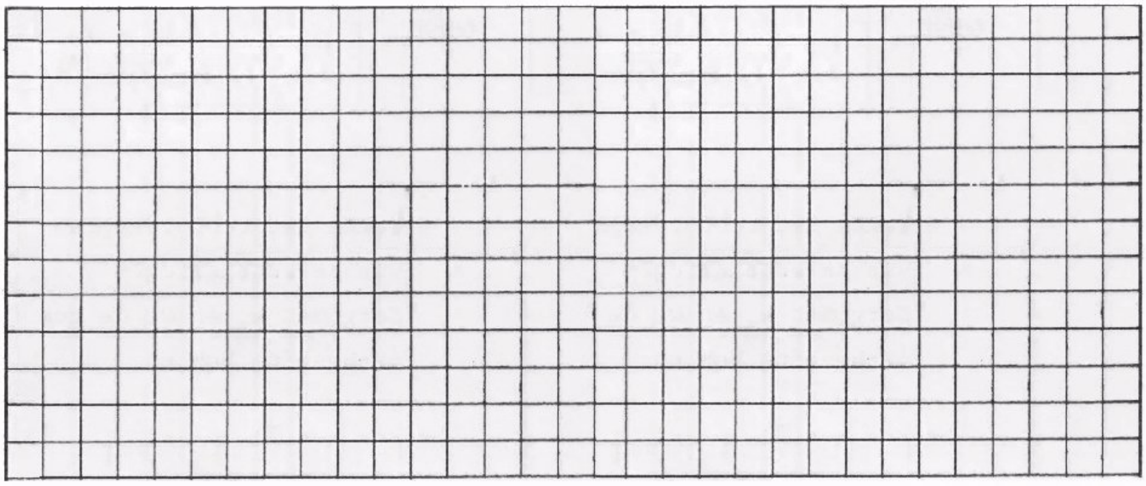
Gegeven is de volgende schakeling. De spoel is ideaal en heeft bij 15 kHz een reactantie van 3 kΩ.



Gevraagd te bepalen I_L, I_R, I en Z.

Bepaal cos φ door opmeting in het vectordiagram.

Oplossing:



I_L =

I_R =

I =

Z =

cos φ =

WISSELSTROOMVERMOGEN

Een schakeling bestaande uit R's, C's en L's, aangesloten op een sinusvormige wisselspanning, neemt een vermogen op

$$\boxed{P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi}$$

Aangezien $U_{eff} = \dfrac{U_t}{\sqrt{2}}$ en $I_{eff} = \dfrac{I_t}{\sqrt{2}}$, kunnen we dit ook schrijven als

$$\boxed{P = \tfrac{1}{2}\, U_t . I_t . \cos \varphi}$$

- Bij een weerstand zijn stroom en spanning in fase. φ is dus gelijk aan 0 en $\cos \varphi = 1$. Voor een weerstand wordt de formule voor het vermogen dus

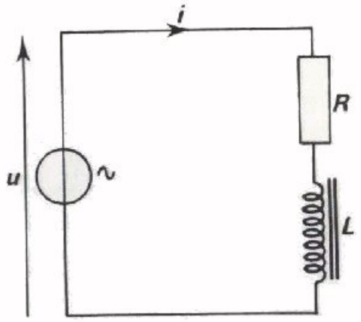
$$\boxed{P = U_{eff} \cdot I_{eff} = \tfrac{1}{2}\, U_t . I_t}$$

- Bij een condensator en bij een spoel is de fasehoek tussen stroom en spanning $\varphi = 90^0$ of $\cos \varphi = 0$. Gemiddeld wordt in een condensator en ook in een spoel *geen* vermogen ontwikkeld.

In een combinatie van R's, C's en L's nemen de R's *wel*, maar de C's en L's *geen* vermogen op.

TEST UZELF

1.



In deze schakeling is

U_t = 10 V

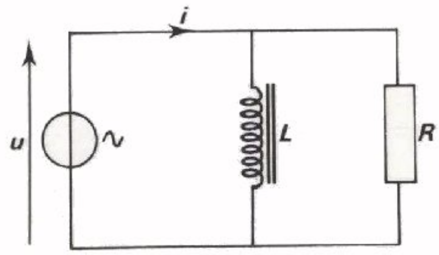
I_t = 10 mA.

Stroom en spanning zijn 60^0 in fase verschoven.

Het door de schakeling opgenomen vermogen is

P = [W]

2.



In deze schakeling geldt

U_{eff} = 1 V

$f = \frac{1}{2\pi}$ kHz (≈ 160 Hz)

R = 100 Ω

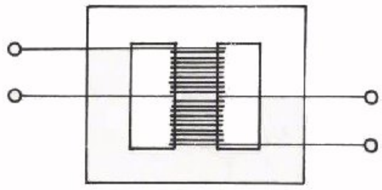
L = 10 mH

Het in deze schakeling opgenomen vermogen is

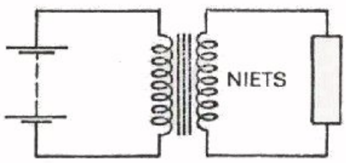
P = [W]

DE TRANSFORMATOR

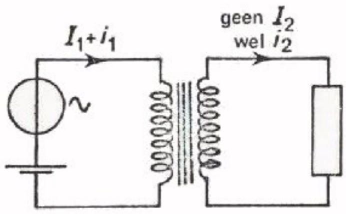
Twee gekoppelde spoelen vormen samen een transformator. Meestal zijn de beide spoelen aangebracht op een gesloten ijzeren kern.
De spoel waaraan spanning of stroom wordt toegevoerd heet de primaire- en de spoel waarop de belasting wordt aangesloten de secundaire wikkeling.



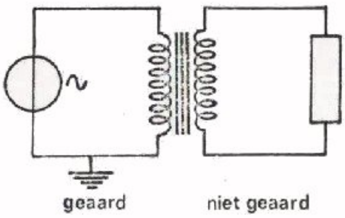
Hieronder zijn de eigenschappen van de trafo kort samengevat.



- Een transformator werkt *niet* op gelijkspanning.
  Voor de werking van een transformator is een veranderende magnetische flux noodzakelijk.



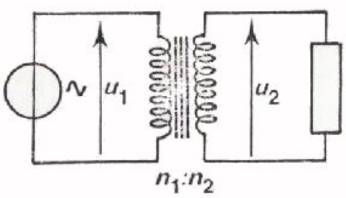
- De primaire en de secundaire stroomkringen zijn geheel van elkaar gescheiden.
  Zo zal bijvoorbeeld een in de primaire stroomkring aanwezige gelijkstroom in de secundaire kring niets veroorzaken.

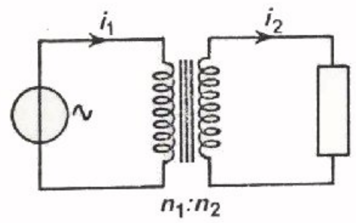


- Verder zal aarding van de ene stroomkring niet automatisch ook aarding van de andere tot gevolg hebben.

- Een transformator kan wisselspanning omhoog of omlaag transformeren:

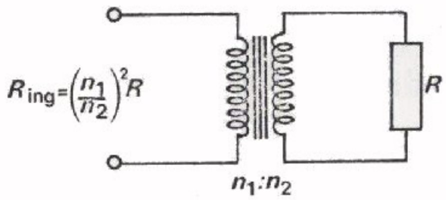
$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}$$





- Een transformator kan een wissel-stroom omlaag of omhoog transformeren

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

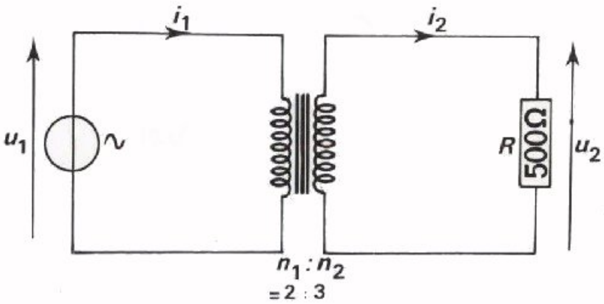


- Een transformator kan een weerstand omlaag of omhoog transformeren

$$R_{ing} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot R$$

TEST UZELF

1.



Bij deze transformator is de primaire spanning U_1 = 12 V.

Bereken nu:

U_2 = ☐

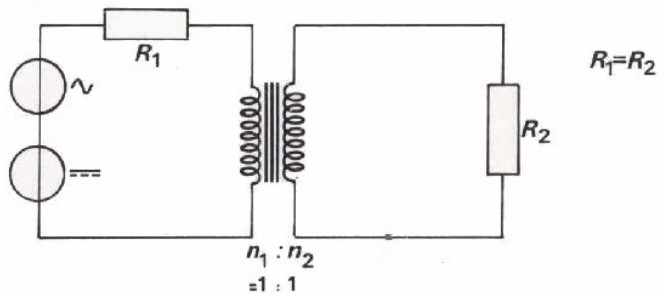
I_2 = ☐

I_1 = ☐

Welke weerstand "ziet men" aan de primaire kant van deze trafo?

R_{ing} = ☐

2.

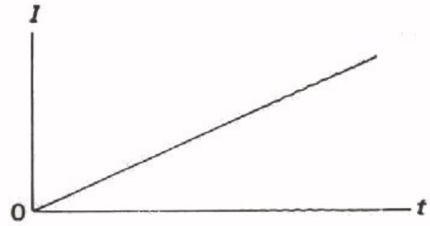


Aan deze schakeling met ideale trafo wordt een *wissel*stroomvermogen van 200 mW en een *gelijk*stroomvermogen van 100 mW toegevoerd.

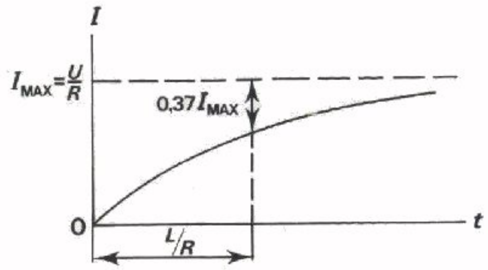
In de weerstand R_2 aan de secundaire zijde wordt een vermogen ontwikkeld, dat:

- gelijk is aan 100 mW O
- gelijk is aan 150 mW O
- gelijk is aan 200 mW O
- gelijk is aan 300 mW O

IN- EN UITSCHAKELEN VAN DE STROOM BIJ EEN SPOEL



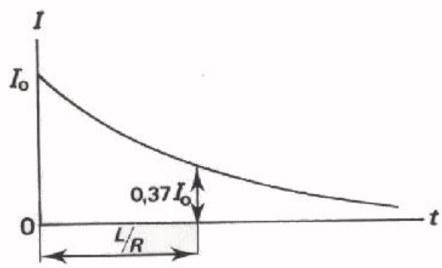
- Sluit men een gelijkspanning aan op een *ideale* spoel, dan neemt de stroom lineair toe.



- Sluit men een gelijkspanning aan op een serieschakeling van een weerstand en een spoel, of een *niet ideale* spoel, dan groeit de stroom door de spoel minder dan lineair aan.

Het toenemen van de stroom geschiedt langzamer
- naarmate de L groter is
- naarmate de R kleiner is.

De stroom neemt tot (100 - 37)% van zijn eindwaarde I_{MAX} toe in $\frac{L}{R}$ seconden, indien L in H en R in Ω wordt ingevuld.
Deze "$\frac{L}{R}$-tijd" van een spoel met weerstand vertoont veel overeenkomst met de "RC-tijd" van een condensator met weerstand.



- Sluit men een stroomvoerende R-L-schakeling plotseling kort, dan neemt de stroom in de spoel minder dan lineair af.
  In de $\frac{L}{R}$-tijd neemt de stroom af tot 37% van zijn beginwaarde I_0.

- Men mag een stroomvoerende spoel nooit plotseling "open" schakelen omdat:
  - de dan optredende grote zelfinductiespanning doorslag van de windingisolatie kan veroorzaken,
  - het optreden van vonken tussen de contacten van de schakelaar deze contacten op den duur doen inbranden.

OEFENING

Een spoel van 10 H heeft een koperdraadweerstand van 100 Ω. Hoe groot is de waarde I_{MAX}, die de stroom op den duur zal krijgen als een spanning van 45 V op de spoel wordt aangesloten?

I_{MAX} =

Hoe groot is de $\frac{L}{R}$-tijd?

$\frac{L}{R}$ =

Als men de maximaal te bereiken waarde van de stroom wil beperken tot 150 mA, hoe groot is dan de weerstand die men in serie met de spoel moet schakelen?

R_s =

Hoeveel vermogen wordt er dan aan deze serieweerstand toegevoerd?

P =

Hoe groot is nu de $\frac{L}{R}$-tijd van de schakeling?

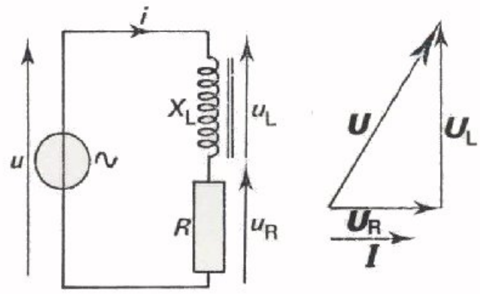
$\frac{L}{R}$ =

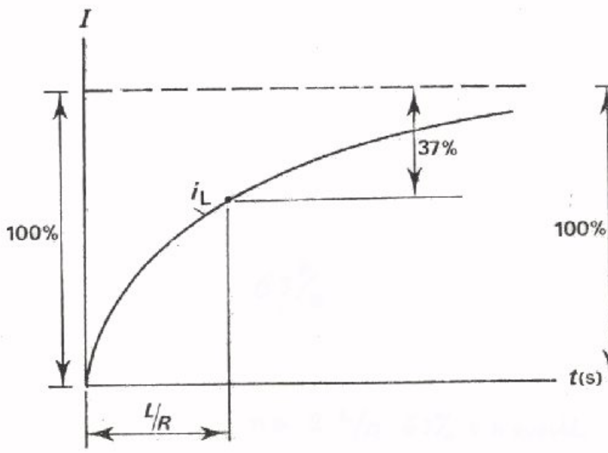
Door R_s in serie te schakelen is de $\frac{L}{R}$-tijd dus vergroot/verkleind

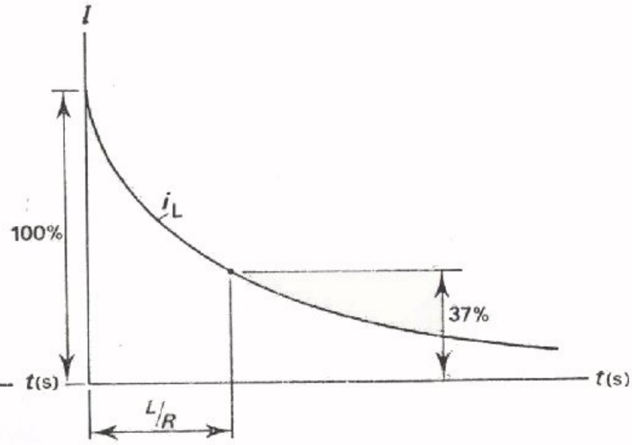
Schets hieronder de grafiek van het aangroeien van de stroom zonder en met serieweerstand.

G E H E U G E N S T E U N

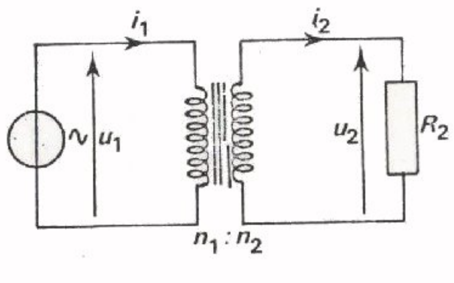
- Bij de praktische spoel ijlt de spanning minder dan 90° voor op de stroom.







- TRANSFORMATOR (IDEAAL)



$$R_{ingang} = \frac{u_1}{i_1} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R_2$$

A51.20